

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

Storia, indirizzo Storia e Informatica

Ciclo XXV

Settore Concorsuale di afferenza: 01/B1 -INFORMATICA

Settore Scientifico disciplinare: INF/01

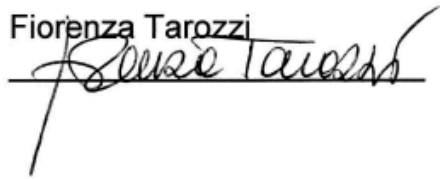
TITOLO TESI

**Leopoli-Cencelle beyond virtual reality
Documentazione, interpretazione e comprensione di una
città medievale**

Presentata da: Maria Doriana De Padova

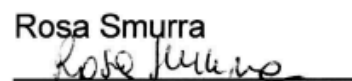
Coordinatore Dottorato

Fiorenza Tarozzi



Relatore

Rosa Smurra



Esame finale anno 2013

Abstract	4
INTRODUZIONE	5
1. IL PROGETTO, ORIGINI E SVILUPPO	8
1.1. Ostacoli, variazioni in corso d'opera e soluzioni	10
1.1.1. L'esperienza svedese	11
1.1.2. Una prima overview sui software utilizzati	14
1.2. Leopoli-Cencelle, una città di fondazione papale	16
1.3. Metodi e tecniche di scavo: un'overview dal 1994 a oggi	26
2. DOCUMENTAZIONE	29
2.1. Il trattamento e la conservazione dei dati a Cencelle nel corso degli anni	31
2.1.1. Documentazione - Un primo esperimento di Laser Scanning a Cencelle	34
2.1.2. Alcune osservazioni e un esperimento	40
2.2. Lo scavo in tempo reale: metodologie digitali integrate per la documentazione, l'analisi e la visualizzazione del dato archeologico.....	45
2.2.1. Esempi di documentazione integrata: Uppåkra	50
2.2.2. Esempi di documentazione integrata: Çatalhöyük.....	52
2.3. L'uso del laser Scanner nella documentazione delle strutture	54
2.3.1. Il post-processing - MeshLab	59
2.4. L'uso dell'Image Based Modelling come strumento rapido e low cost per la documentazione e l'acquisizione in tempo reale	62
2.4.1. Il procedimento	64
2.5. Laser scanning e Computer Vision: alcuni casi-studio	71
2.5.1. Pompeii - a 3D revival.....	71
2.5.2. The 2012 Petra Cyber-Archaeology Conservation Expedition	73
2.5.3. Extreme SfM - Underwater Archaeology	75
3. INTERPRETAZIONE.....	78
3.1. Interpretare in 3D: un metodo trasparente e sostenibile	81
3.2. Il processo interpretativo applicato a Cencelle: "ricostruzione" o "modello"?	83
3.3. Interpretazione da 3D: da Londra alla University of Queensland: "Establishing the Conditions for Performance of Christopher Marlowe's Dr Faustus in a Virtual Model of London's 1594 Rose Theatre"	85

3.3.1. Reassessing Cencelle: a quantitative archaeology evaluation	90
4. COMPRENSIONE	95
4.1. L'Edilizia residenziale a Leopoli-Cencelle	96
4.2. Dalla documentazione 2D ai dati 3D alla modellazione con Blender: la pipeline	100
4.3. Modelling space and time as room of possibilities: paralleli fra teorie derivate da dati di scavo e da una restituzione filologica tridimensionale	105
4.3.1. Il settore I: ambienti e ipotesi	106
4.3.1.1. Comparazione da 3D: la questione delle vaschette	112
4.3.2. Il Settore III	116
4.4. Dati di scavo, confronti, contesto storico: restituzione filologica o compromesso? Il dilemma delle aperture	129
4.5. Dati di scavo, dati 3D, modelli tridimensionali: integrazione, interpretazione e comprensione	131
4.6. Visualizzazione e comunicazione	142
CONCLUSIONI	145
GLOSSARIO	149
ABBREVIAZIONI BIBLIOGRAFICHE	161
RISORSE IN RETE	177
INDICE DELLE FIGURE	182
APPENDICE	190
RINGRAZIAMENTI	193

Abstract

La città medievale di Leopoli-Cencelle (fondata da Papa Leone IV nell'854 d.C. non lontano da Civitavecchia) è stata oggetto di studio e di periodiche campagne di scavo a partire dal 1994. Le stratigrafie investigate con metodi tradizionali, hanno portato alla luce le numerose trasformazioni che la città ha subito nel corso della sua esistenza in vita. Case, torri, botteghe e strati di vissuto, sono stati interpretati sin dall'inizio dello scavo basandosi sulla documentazione tradizionale e bi-dimensionale, legata al dato cartaceo e al disegno. Il presente lavoro intende re-interpretare i dati di scavo con l'ausilio delle tecnologie digitali. Per il progetto sono stati utilizzati un laser scanner, tecniche di Computer Vision e modellazione 3D. I tre metodi sono stati combinati in modo da poter visualizzare tridimensionalmente gli edifici abitativi scavati, con la possibilità di sovrapporre semplici modelli 3D che permettano di formulare ipotesi differenti sulla forma e sull'uso degli spazi. Modellare spazio e tempo offrendo varie possibilità di scelta, permette di combinare i dati reali tridimensionali, acquisiti con un laser scanner, con semplici modelli filologici in 3D e offre l'opportunità di valutare diverse possibili interpretazioni delle caratteristiche dell'edificio in base agli spazi, ai materiali, alle tecniche costruttive. Lo scopo del progetto è andare oltre la Realtà Virtuale, con la possibilità di analizzare i resti e di re-interpretare la funzione di un edificio, sia in fase di scavo che a scavo concluso. Dal punto di vista della ricerca, la possibilità di visualizzare le ipotesi sul campo favorisce una comprensione più profonda del contesto archeologico. Un secondo obiettivo è la comunicazione a un pubblico di "non-archeologi". Si vuole offrire a normali visitatori la possibilità di comprendere e sperimentare il processo interpretativo, fornendo loro qualcosa in più rispetto a una sola ipotesi definitiva.

INTRODUZIONE

“Uniqueness and duration are as tightly intertwined as transience and reiterability. Stripping the object of its sheath, shattering the aura, bear witness to a kind of perception where a sense of similarity in the world is so highly developed that through reproduction, it even mines similarity from what only happens once.”

(Walter Benjamin, “The Work of Art in The Age of Mechanical Reproduction”)

“Virtuale”¹ è forse oggi uno dei termini più usati e dibattuti in ogni campo, dai rapporti sociali alla vita di ogni giorno. Nell’ambito della fruizione e gestione dei beni culturali si moltiplicano i *Virtual Environments*² e le visualizzazioni tridimensionali di siti, scavi, reperti. Secondo una delle prime definizioni nell’ambito dei beni culturali *“Virtual Reality models allow us to put all of our contemporary knowledge and thought about an object into a user-interactive presentation”*³. Alcuni modelli virtuali vengono utilizzati per esplorare e analizzare oggetti dei quali l’utente si è già fatto un’idea. Altre rappresentazioni hanno come fine la comunicazione di una ricerca. È a questo punto che bisogna domandarsi se il fine ultimo di un modello virtuale sia comprendere meglio i dati, oppure semplicemente comunicare, così com’è, una conclusione a cui si è già approdati. Nei primi anni dell’utilizzo di queste tecniche in archeologia l’intento era quello di presentare al meglio delle teorie già elaborate, ma oggi si percepisce il bisogno di offrire sia a un pubblico di studiosi sia a uno di utenti “normali” la possibilità di visualizzare e interpretare un manufatto. Questo il motivo per cui nel presente lavoro si è scelto di non utilizzare il

¹ *“Virtual Reality (VR): an immersive and interactive simulation of either reality-based or imaginary images and scenes”*. <http://www.unesco.org/education/lwf/doc/portfolio/definitions.htm>

² *Virtual Environment*: collezione di informazioni che descrivono un ambiente tridimensionale basato su oggetti e dati reali oppure astratti. (Lercari 2011, Glossario).

³ Barceló *et al.* 2000

termine “ricostruzione”. Una ricostruzione, infatti, implica qualcosa che viene comunicato come definitivo, una conclusione già tratta e irreversibile. In questo caso non si tratta di ricostruire una città, ma di interpretare ciò che ne resta, proponendo ipotesi e allo stesso tempo aprendo una via affinché queste ipotesi vengano implementate. Andare oltre la Realtà Virtuale in questo progetto significa imprigionare i resti effimeri e trasformarli in dati che possano essere compresi, elaborati e comunicati anche al di là delle fasi di scavo, anche da persone differenti da chi ha scavato anni addietro. In questo modo non si avranno ricostruzioni concluse ma “modelli” che andranno evolvendosi man mano che lo scavo si evolve.

Nel presente lavoro, che descrive un progetto trasversale a più discipline, dall’archeologia, alla storia, all’informatica, si è scelto di partire introducendo lo scavo, la sua storia, le metodologie applicate e di proseguire nell’elaborazione della sezione tecnologica, cercando, per quanto possibile, di non dare per scontati la terminologia o i metodi utilizzati, sia nel campo archeologico che in quello delle tecnologie.

Il presente progetto, che si pone come un punto d’inizio per studiare e comunicare lo scavo di Cencelle, nasce *in primis* dalla necessità di reperire dati in tempo reale, che siano quindi utilizzabili anche sul campo, in risposta alle difficoltà oggettive riscontrate negli anni precedenti nella visualizzazione e nella consultazione del materiale delle numerose campagne passate. Un altro elemento di necessità è dato dalla mole di tempo necessario ad acquisire e interpretare i risultati (spesso archiviati su supporto cartaceo e, per i più recenti, in CDRom) di chi ha scavato negli anni precedenti. Tali urgenze hanno portato all’esigenza di creare una *pipeline* che permetta di documentare in tempo reale, mentre si scava, integrando più modalità di acquisizione, sfruttando software di facile apprendimento e utilizzo, spesso *open source*, che permettano di mantenere una linea *low cost* data la scarsa disponibilità economica di uno scavo universitario. Il fine ultimo, è quello di giungere a una

disponibilità di dati che si possano combinare là dove c'è carenza di informazioni, che possano essere facilmente comunicati sia agli studiosi che al pubblico, che possano essere liberamente fruiti e naturalmente implementabili man mano che le campagne di scavo procedono. Un primo passo per riuscire a creare un metodo che possa essere seguito nelle campagne a venire, consiste nella formazione dei responsabili e degli studenti. A questo proposito, sia sul campo, sia nel corso degli ultimi anni accademici, si svolgono laboratori e seminari che intendono formare chi scava sulle tecnologie integrate per la visualizzazione dello scavo, su tecniche di acquisizione, *Computer Vision* e software per l'elaborazione dei dati. La speranza è che lo scavo diventi una "catena di montaggio" che insegni sì le tecniche tradizionali, ma riesca a formare rapidamente chi scava, perché si possano acquisire e digitalizzare dati giorno per giorno, secondo una *pipeline* stabilita, senza che nulla, della ricchissima mole di dati offerti da un sito come Cencelle, "la Pompei medievale" vada perduto.

1. IL PROGETTO, ORIGINI E SVILUPPO

Il progetto “Cencelle beyond virtual reality” vuole essere la naturale prosecuzione di un lavoro intrapreso nel 2005 come tesi di laurea, continuato dal 2007 al 2010 come tesi della II Scuola di Specializzazione in archeologia tardo-antica e medievale presso l’Università “La Sapienza” di Roma. Entrambi i progetti si erano concentrati sull’analisi di uno dei settori di edilizia abitativa a Leopoli-Cencelle⁴ e in particolare sulle tipologie di “case a schiera” e “case a corte” nella loro fase di età Comunale, presenti in più settori dello scavo che aveva interessato la città medievale. Ne era derivato un esperimento di visualizzazione tridimensionale, sviluppato con CAD⁵ (Fig.1), che mostrasse attraverso modelli assolutamente filologici dei lotti, l’assetto, la forma e il rapporto tra le strutture.

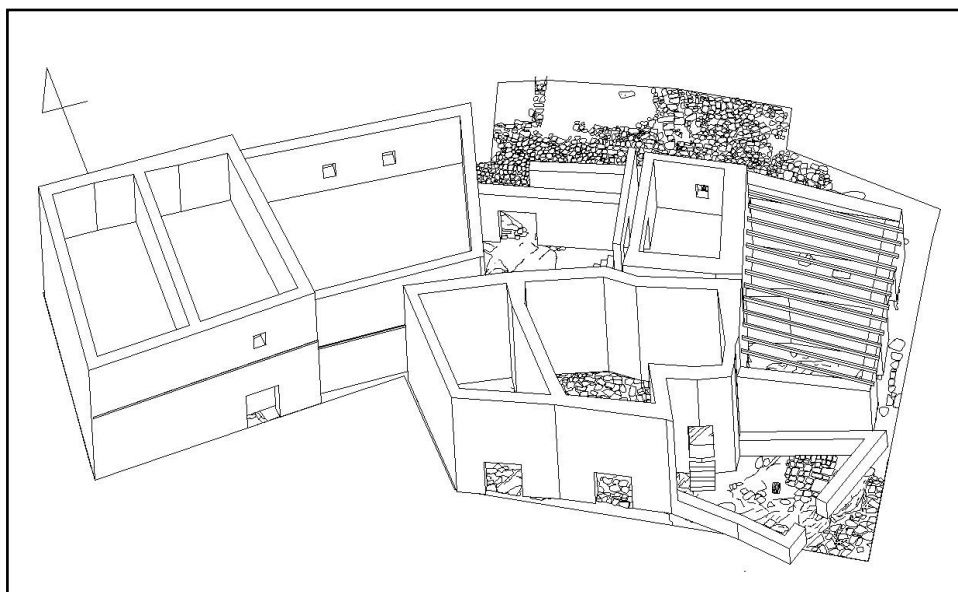


Fig. 1. La modellazione filologica dei lotti abitativi del Settore III di Cencelle

Dal 2010, grazie al Dottorato in Storia e Informatica dell’Università di Bologna è stato possibile elaborare un progetto di visualizzazione

4 Cfr. Paragrafo 1.1

5 CAD (Computer-Aided Design) è l’uso di sistemi informatizzati per la creazione, modifica, analisi o ottimizzazione di un disegno. Nel caso del CAD, generalmente si tratta di produrre un disegno tecnico mediante l’uso di un software. <http://it.wikipedia.org/wiki/CAD>

tridimensionale dello scavo. Leopoli-Cencelle è un sito attualmente non accessibile al pubblico, nel quale l'acquisizione dati è ancora in corso e le campagne di scavo si susseguono periodicamente; questo aveva fatto sì che originariamente si pensasse a un progetto di musealizzazione virtuale dell'intero sito che permettesse di conoscere una tale meraviglia medievale non solo agli studiosi ma anche al pubblico. Il sito, infatti, ha enormi potenzialità, dal momento che è molto vicino a Civitavecchia, porto turistico che giornalmente vede sbarcare un gran numero di turisti dalle grandi navi da Crociera che solcano il Mediterraneo. In più Civitavecchia è connessa a Cencelle da un'antica linea ferroviaria in disuso, che se riattivata potrebbe rendere facilmente raggiungibile questa zona che al momento è separata dalla via principale, l'Aurelia, da circa 10 minuti di strada bianca da percorrere con cautela. Purtroppo al momento, sia per inevitabili problemi burocratici, sia per i costi elevati di una tale operazione, la musealizzazione dell'area di scavo resta un sogno che si spera si avveri. Ma dal sogno al virtuale il passo è breve: da qui è nato il progetto originario, oggetto dei tre anni di dottorato.

Nella sua fase iniziale questo prevedeva:

- L'utilizzo di un software chiamato CityEngine⁶ per elaborare i dati raccolti, e creare *proceduralmente* (cioè inserendo delle "regole" in una riga di comando) l'assetto urbanistico della città sull'esempio di "*Rome Reborn*"⁷ (Fig. 2).

6 Esri® CityEngine® "A procedural software, allows creating city models, architecture, simulation, game development, and film production. CityEngine delivers a full suite of industry-leading procedural tools to aggregate geospatial data, lay out and edit street networks, generate and modify buildings, create 3D road profiles and distribute street furniture, control the shape of the skyline, and analyze urban planning projects".

<http://www.esri.com/software/~media/Files/Pdfs/library/brochures/pdfs/esri-cityengine.pdf>

7 "Rome Reborn is an international initiative whose goal is the creation of 3D digital models illustrating the urban development of ancient Rome from the first settlement in the late Bronze Age (ca. 1000 B.C.) to the depopulation of the city in the early Middle Ages (ca. A.D. 550). The Rome Reborn team intends to move both backwards and forwards in time until the entire span of time foreseen by our mission has been covered".

<http://www.romereborn.virginia.edu/>



Fig. 2. Un'immagine del progetto "Rome Reborn"

- la modellazione dei restanti edifici e dei particolari con Blender⁸;
- la produzione di modelli degli oggetti per la comunicazione dello scavo;
- lo studio di un sistema che rendesse possibile la fruizione e la navigazione del modello.

1.1. Ostacoli, variazioni in corso d'opera e soluzioni

Il primo ostacolo decisamente imponente che si è presentato è stata la carenza di dati. Pur essendo in corso da anni, lo scavo non è mai stato gestito con un GIS⁹ e solo di recente i dati di scavo sono stati digitalizzati. C'è stato un unico esperimento di acquisizione con *laser scanner*¹⁰ di cui si parlerà in seguito. Oltre allo scavo, sono attualmente in corso

8 Blender "*is a free and open source 3D computer graphics software product used for creating animated films, visual effects, interactive 3D applications or video games. Blender's features include 3D modeling, UV unwrapping, texturing, rigging and skinning, fluid and smoke simulation, particle simulation, animating, camera tracking, rendering, video editing and compositing. It also features a built-in game-engine*".

www.Blender.org

9 "*Geographic Information System (GIS) is a system designed to capture, store, manipulate, analyze, manage, and present all types of geographical data. In the simplest terms, GIS is the merging of cartography, statistical analysis and database technology*".

http://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system

10 Alvaro, Liberotti, Nepi 2009

campagne per il rilevamento topografico, per l'acquisizione e il posizionamento della cinta muraria su un GIS. La mancanza dunque di dati che riguardassero le mura, creava degli impedimenti all'idea originaria di analizzare e digitalizzare il circuito murario per poi spostarsi all'intera città. Un altro ostacolo consiste nel fatto che alcuni settori di scavo sono studiati da un'altra università. Ciò rende alcuni dati difficilmente reperibili e integrabili, almeno finché questi restano inediti. Tali difficoltà hanno fatto sì che l'idea della riproduzione dell'intera città con un software procedurale venisse accantonata. Si è pensato di sopperire a tale mancanza utilizzando Blender, un software *open source* di modellazione per la restituzione di alcuni degli isolati; ma come presentare i modelli? E soprattutto: quale valore avrebbe aggiunto tale espediente alla visualizzazione e alla fruibilità dei dati? C'era bisogno dunque di una domanda di ricerca chiara, che permettesse di rendere credibili e facilmente utilizzabili i modelli filologici attraverso i quali la città sarebbe tornata in vita. Una semplice modellazione degli edifici della città, in un'unica versione e con una sola unilaterale interpretazione, non solo non avrebbe risposto alle domande ma sarebbe stato l'ennesimo esempio di modello 3D difficilmente comprensibile da parte di chi è abituato alla consultazione cartacea. Un tale risultato probabilmente sarebbe divenuto presto datato e sarebbe stato accantonato in breve tempo.

Si è scelto dunque di andare oltre la Realtà Virtuale e di produrre modelli che illustrassero lo stato attuale dello scavo e che allo stesso tempo permettessero di formulare ipotesi sulla base dei dati prodotti nel corso degli anni e di quelli ottenuti durante l'ultima campagna di acquisizioni.

1.1.1. L'esperienza svedese

Un periodo di internazionalizzazione del dottorato, concesso dall'Università di Bologna, svoltosi presso *Lunds Universitet*, Svezia e durato da Marzo a Dicembre 2012, ha consentito di approfondire la conoscenza degli strumenti menzionati e affinare la tecnica. L'area di

lavoro è stata ridimensionata, si è deciso di prendere in considerazione l'edilizia abitativa per un progetto che potrà avere in futuro la sua estensione naturale a tutta la città, man mano che lo scavo e l'acquisizione dei dati procedono. Si è giunti inoltre a una domanda di ricerca più mirata che puntasse non solo alla comunicazione del dato archeologico, ma anche all'utilizzo del 3D nell'archeologia sul campo e soprattutto nell'interpretazione del dato stesso attraverso la visualizzazione tridimensionale. L'università di Lund ha messo a disposizione del progetto presentato dall'autore in qualità di *visiting researcher*, i mezzi dello *Humanities Lab*: software, postazioni multimediali, *laser scanner*, GPS differenziale e l'impagabile collaborazione dei tecnici del laboratorio. Nel corso del mese di Ottobre 2012, nell'ambito del progetto Erasmus attivato fra la cattedra di Archeologia Medievale della Sapienza e il dipartimento di *Historical Archaeology* di Lund, è stata organizzata una campagna di acquisizione presso lo scavo di Cencelle. Con la collaborazione del Dr. Nicolò dell'Unto e di Stefan Lindgren, responsabile dello *Humanities Lab*, con l'ausilio di un *laser scanner* e di un GPS differenziale, si è proceduto all'acquisizione del quartiere Sud-Orientale della città medievale. Con tecniche di *Computer Vision* si è proceduto poi all'acquisizione delle sepolture in fase di scavo, con la possibilità di documentare lo scavo giorno per giorno (Fig. 3).

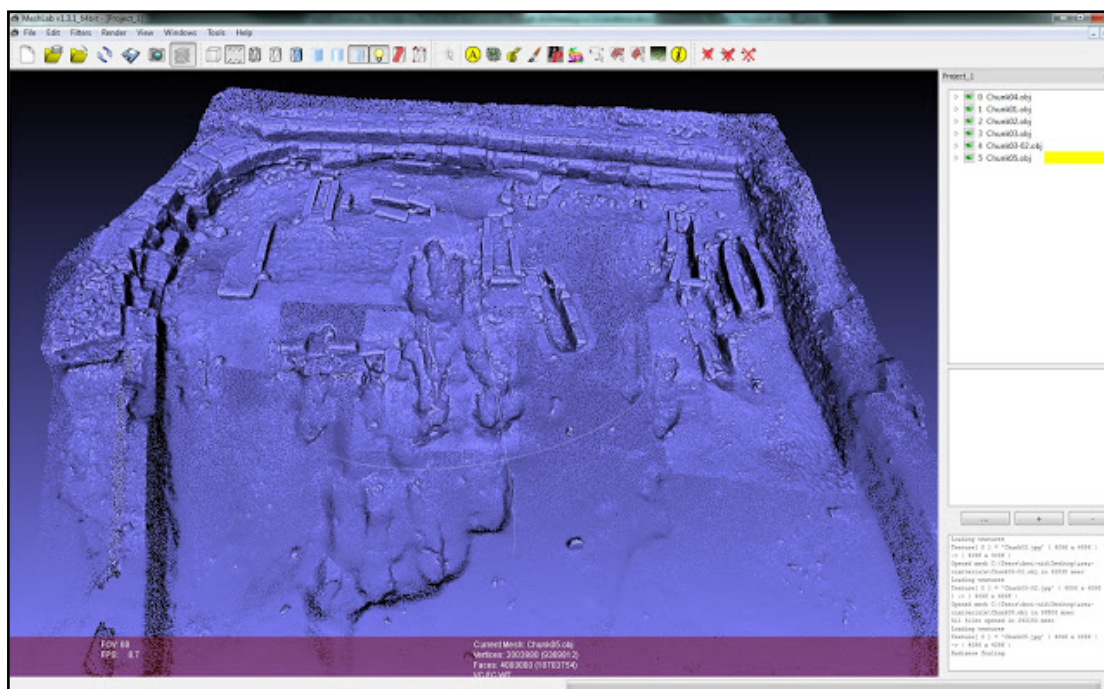


Fig. 3. Le acquisizioni dell'area cimiteriale effettuate in *Computer Vision* – Giorno 1

“Our work was mainly focused on finding a work methodology that could have been easily integrated with the current system of documentation in use in Cencelle”¹¹ (Fig. 4).

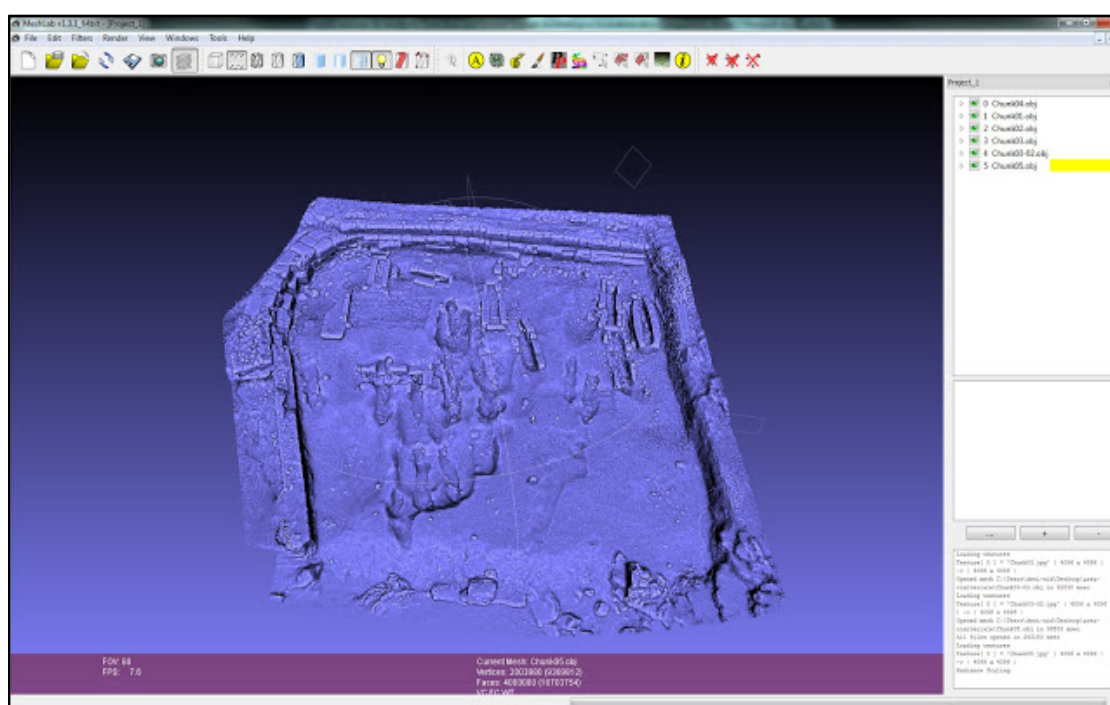


Fig. 4. Le acquisizioni nell'area cimiteriale di Cencelle in *Computer Vision* - Giorno 2

11 *Digital Archaeology Blog* - Nicolò dell'Unto
<http://nico-digitalarchaeology.blogspot.it/>

Come risultato finale si sono ottenuti dati omogenei e coerenti già digitalizzati, che non era mai stato possibile acquisire in tale quantità e in tempi così ridotti nel corso delle precedenti campagne di scavo.

1.1.2. Una prima *overview* sui software utilizzati

Considerato il difficile accesso ai materiali rinvenuti nello scavo, molti dei quali conservati presso il Museo di Civitavecchia, altri nei depositi dell'Università, si è scelto di acquisire fotograficamente e processare con l'utilizzo della *Computer Vision* alcune delle suppellettili *in situ* (Fig. 5) come ad esempio le numerose vaschette, sul cui uso ancora si dibatte, presenti nelle aree delle lavorazioni artigianali e in quelle abitative della città. Agisoft PhotoScan¹², il software utilizzato, è uno strumento potente che permette di ottenere modelli tridimensionali ad alta risoluzione da immagini fotografiche risparmiando in termini di tempo e di costi rispetto a un *laser scanner*).

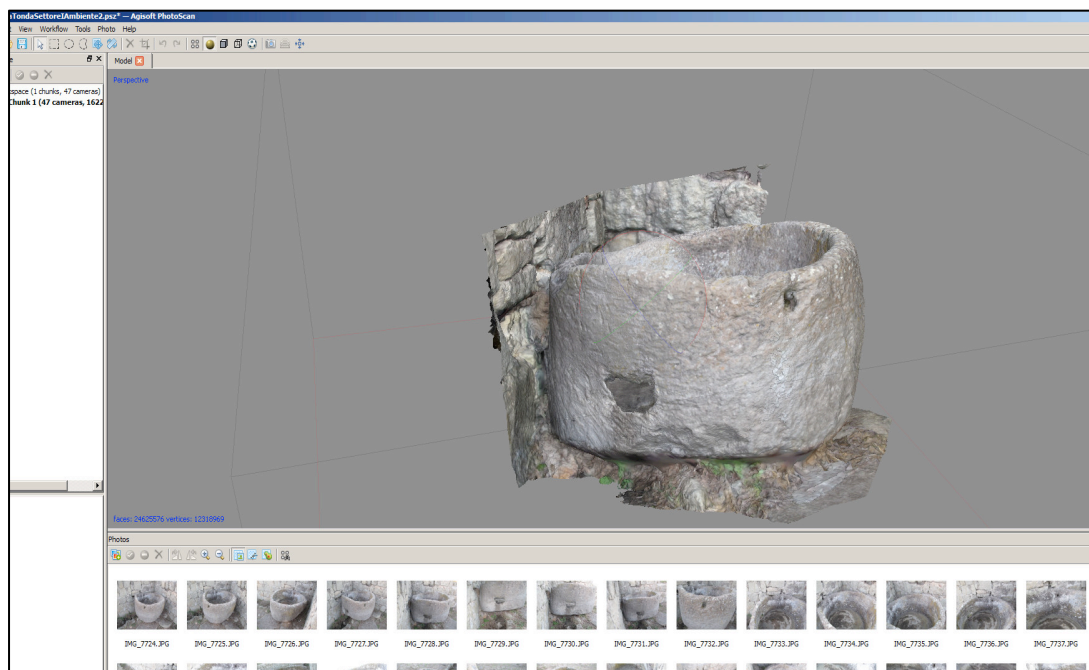


Fig. 5. Una delle numerose vaschette presenti nei quartieri residenziali restituita in 3D con PhotoScan

12 "Agisoft PhotoScan automatically builds professional quality textured 3D models from still images. The program provides robust photo alignment, no coded targets or special shooting conditions being needed".
<http://www.agisoft.ru/products/PhotoScan/>

Il secondo software, gratuito e *open source*, su cui si è puntato, è MeshLab¹³, utilizzato per processare *mesh* poligonali e nuvole di punti, prodotte dall'acquisizione con *laser scanner* e con software che utilizzano algoritmi di “*Structure From Motion (SFM)*” e “*Dense Stereo Matching*” come PhotoScan¹⁴. Accanto a questi software fondamentali, è stato indispensabile l'utilizzo di Autodesk MeshMixer¹⁵, anch'esso gratuito, utilizzato per rivedere la geometria ottenuta dall'elaborazione dei dati, per “ripulirla” dal normale rumore generato dalla nuvola di punti e per “chiudere i buchi” causati dall'assenza di informazioni su determinate parti della geometria. Per quanto riguarda la navigazione in tempo reale all'interno dei modelli si è pensato di utilizzare Unity 3D¹⁶, un *game engine*¹⁷ gratuito che permette di creare contenuti tridimensionali interattivi.

13 “MeshLab is an open source, portable, and extensible system for the processing and editing of unstructured 3D triangular meshes. The system is aimed to help the processing of the typical not-so-small unstructured models arising in 3D scanning, providing a set of tools for editing, cleaning, healing, inspecting, rendering and converting this kind of meshes”.

<http://MeshLab.sourceforge.net/>

14 Cfr. Capitolo 2.

15 “MeshMixer is a prototype design tool based on high-resolution dynamic triangle meshes”.

<http://www.autodeskresearch.com/projects/meshmixer>

16 “Unity is a game development ecosystem: a powerful rendering engine fully integrated with a complete set of intuitive tools and rapid workflows to create interactive 3D content; easy multi-platform publishing; thousands of quality, ready-made assets in the Asset Store and a knowledge-sharing Community. For independent developers and studios, Unity’s democratizing ecosystem smashes the time and cost barriers to creating uniquely beautiful games”

<http://unity3d.com/unity/>

17 Un sistema per la creazione e lo sviluppo di *videogames*.

1.2. Leopoli-Cencelle, una città di fondazione papale



Fig. 6. La città di Leopoli-Cencelle vista da Ovest giungendo dalla via Aurelia

“Chiunque intenda fondare una città deve per prima cosa esaminare il sito per verificare se è appropriato, in modo che le mura che saranno costruite saranno capaci di resistere ad un assedio. Subito dopo occorre esaminare l’acqua per appurare se è buona da bere e se è bastante per la popolazione della città e anche per tutti coloro che potrebbero trovarvi rifugio in tempo di pericolo. Se la sorgente d’acqua è situata fuori dalle mura, la costruzione della città deve essere abbandonata, oppure si deve trovare il modo per consentire ai portatori d’acqua di uscire dalla città anche in presenza del nemico. Si deve scoprire se c’è a disposizione della pietra, già tagliata o facilmente estraibile, in modo che non sia necessario trasportarla da una lunga distanza a grande rischio. Si deve anche scoprire se il legname deve essere trasportato da molto lontano o attraversando terreno difficile, così che sia pressoché impossibile averlo a

portata di mano per la costruzione. Si deve scoprire se la zona produce abbastanza cibo oppure può esservi trasportato da altre zone. Se a tutte queste cose si può rispondere affermativamente, si proceda con la costruzione; ma se non è così, è meglio abbandonare il progetto”¹⁸.

Queste erano le prescrizioni codificate nei trattati militari bizantini che i funzionari del patriarcato lateranense incaricati, alla metà del secolo IX, di cercare un posto per fondare una nuova città, dovevano conoscere a menadito. La ricerca di un luogo che soddisfacesse tali requisiti, dove mettere al sicuro agli abitanti della romana *Centumcellae* (l'attuale Civitavecchia) dalle incursioni dei Saraceni, fu lunga e laboriosa: “*loca quae ei affinitate erant coniuncta diligenti cura se studio praevidit atque conspexit. Sed ubi locus videbatur idoneus ad urbem aedificandam, aquae gestabat penuriam*” riferisce il biografo attribuendo la ricerca direttamente al pontefice Leone IV (847- 855) che finalmente “*pervenit ad locum optimum valdeque munitum [...] et aquarum copiam ad populum confortandum et caeteras utilitates humanas, aquimolosque molentes pleniter subministrant*”¹⁹.

Il pontefice, grato al Signore per la possibilità di fondare la “*civitas, cui ex nomine proprio Leopolim nomen imposuit [...] et aquae abundantiam ministrare, etiam lapides et arenam inibi tribuere*” una città in cui “*et populus salvus existeret*”, assegnò l'incarico della costruzione a un *magister militum*, Pietro, che per la sua formazione nonostante l’“*angustia loci*”, poteva garantire una certa efficienza della difesa, in modo che la nuova città “*ne unquam ab hostibus capiatur vel invagatur*”²⁰. La sicurezza dunque costituiva un presupposto primario, come lo era nel *De re strategica* “di modo che la popolazione non subisse alcun danno dal

18 Dennis 1985, pp. 31-37

19 Duchesne 1955, p. 131.

20 Duchesne 1955, p. 132.

nemico”²¹. Tale presupposto era proclamato nell’epigrafe che sovrastava la porta principale -quella orientale- che dava accesso alla neonata città di Leopoli,: *“Quamvis in parvo con(s)istat condita (loco) urbs haec nulla hominum se(u be)lla nocere va(lebunt). Desinat hinc bellator (atr)oxiam, desinat hostis, non hanc ut q(uisquam valea)t urbem violare”*²². Il trattato giustiniano, con le prescrizioni in dettaglio per la scelta del sito *“i luoghi per costruire una città [...] sono quelli su terreno elevato con pendii scoscesi tutto intorno, in modo che l’accesso sia reso difficile”* e con imprescindibili requisiti come la possibilità di difesa e l’approvvigionamento idrico, alimentare e di materiali per l’edilizia, pone dunque le basi per una nuova cultura nella fondazione delle città. Parlando della costruzione delle mura, oltre alle misure di altezza e spessore, il trattato prescrive interventi che garantiscano una maggiore difendibilità: *“stando lontani circa 30 o 40 picheis (circa 25 metri) dal muro, rimoviamo la terra intorno alla collina in cerchio, scavandola verticalmente in modo da creare una forte pendenza verso il basso. Ciò pone due ostacoli sulla strada del nemico verso la cima della collina: il taglio nella terra, che non dovrebbe essere meno profondo di tre picheis (2 metri) e il pendio assai ripido che si forma all’esterno di esso”* ²³.

Oltre ai trattati militari bizantini, anche la trasmissione dei trattati tecnici classici sull’architettura, come quello celeberrimo di Vitruvio, divennero la base del progetto della nuova città, elaborato dal papato e fatto realizzare a un militare. Ma quali caratteristiche fecero cadere la scelta proprio su quella collina? Il luogo, sulla sommità di un’altura, si trova poco lontano dal fiume Mignone (Fig. 7) che scorre a Ovest e dal rio Melledra che lo

21 Dennis 1985, pp. 31-37

22 “La grande lastra litica, una tabula ansata, con il testo epigrafico, fu rinvenuta alla fine del secolo XIX all’altezza della porta orientale; conservata al Comune di Civitavecchia subì danneggiamenti in occasione dei bombardamenti dell’ultima guerra mondiale e oggi è conservata, lacunosa e in più frammenti, nei depositi del Museo Archeologico di Civitavecchia in attesa di una più degna collocazione”. (Marucchi 1899, pp. 195-203).

23 Dennis 1985, pp. 31-37

circonda da Ovest a Nord²⁴ garantendo a breve distanza non solo acqua ma anche sabbia per l'edilizia, come hanno documentato le analisi sulle malte utilizzate nella costruzione della città.

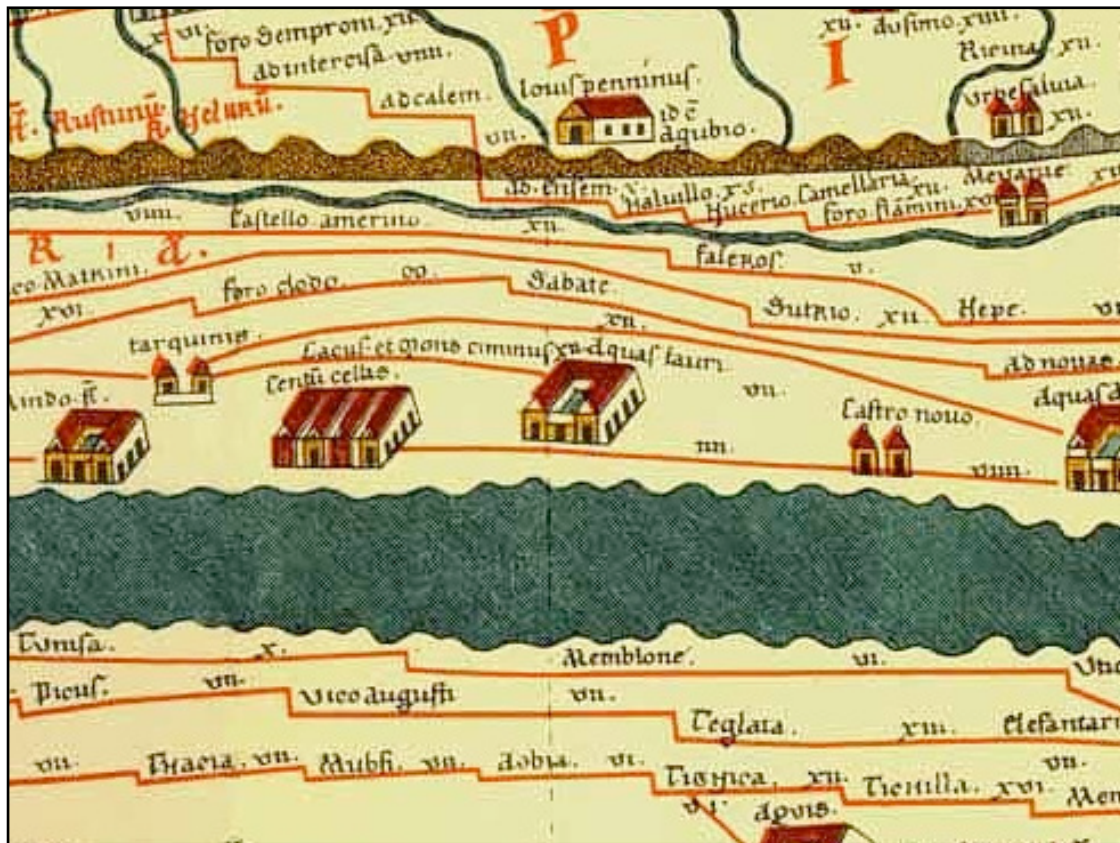


Fig. 7. La rappresentazione di *Centumcellae* sulla *Tabula Peutingeriana*, la copia di XII secolo di una mappa romana

In più, sul versante della collina a Est della città, una sorgente ancora in vita consentì di dotare il nuovo insediamento anche di un acquedotto sotterraneo. Il territorio circostante doveva essere quindi adatto alle coltivazioni, come documenta la fitta presenza di *villae* con continuità di vita in molti casi almeno fino al secolo VI, attestate per l'età romana²⁵. Per il rifornimento del legname non dovevano mancare anche le zone boschive, che sono sopravvissute ancora oggi in un paesaggio che ha mantenuto quasi intatte le sue caratteristiche. Infine, per la costruzione delle mura e per alcune unità edilizie delle fasi più antiche fu impiegato un

²⁴ Nardi 1999, p. 113 e fig.1.

²⁵ Cfr. Schede in Leopoli - Cencelle II 1996

tufo proveniente da cave aperte a poca distanza, nel territorio della Farnesiana, mentre poco dopo gli abitanti furono costretti ad allestire cave direttamente sui fianchi stessi della collina di trachite scelta per l'insediamento.

Il 15 agosto 854, quando il pontefice Leone IV giunse da Roma con una solenne processione per consacrare Leopoli²⁶, tutte le prescrizioni dovevano essere state garantite e la città doveva essere già costruita almeno nelle sue strutture essenziali: mura, strade, acquedotto, edifici culturali, edifici residenziali e abitazioni.

Leopoli-Cencelle, città di fondazione voluta da Leone IV, oggi costituisce un "modello" eccezionale e unico per molti aspetti sul piano urbanistico a partire dal fatto che, al contrario di altre città altomedievali, se ne conosce con precisione la data di nascita. Attraverso Cencelle, è possibile conoscere i criteri e le modalità nelle fondazioni di committenza aulica, di età carolingia. In questo caso, vista la gravità e l'urgenza della situazione, si tratta di un papa che affida l'esecuzione a un *magister militum*, un esperto di insediamenti militari fortificati.

Leopoli-Cencelle, che si staglia dall'alto del suo colle di trachite, anche se ampiamente ristrutturata in età comunale, lascia ancora intravedere i resti della sua prima fase di vita. Indicata nei documenti successivi come *Civitas Centumcellensis*, *Castrum Centumcellense*, con i toponimi Cencelle/Cincelle nel '600 e oggi Centocelle (IGM 142, I, SE "La Farnesiana"), si trova su un'altura che "*XII a Centumcellensi urbe miliario*

26 "[...] urbem Leopolim saepedictus pontifex litanis et orationibus pedibus propriis circumivit [...] ac missarum, ut solitus erat, officium rite persolvens, et aquam benedictam per muros iactare praecipiens [...] octavo scilicet mense [...] dieque decimo quinto, omnis murorum ambitus completus atque perfectus est, anno praesulatus eius octavo, indictione II". (Duchesne 1955, p.132).

*distat*²⁷, a una quota di circa 160 metri s.l.m.²⁸. Sui fianchi della collina dove il pendio era più dolce, si notano ancora i tagli frutto delle asportazioni che hanno messo in evidenza il banco roccioso. Probabilmente furono operati al momento della fondazione e in epoca comunale furono utilizzati come banchi di cava secondo le regole stabilite dall'Anonimo del trattato di strategia²⁹. Una strada, visibile già ai piedi della collina, pavimentata con grossi basoli ricavati nel piano roccioso, saliva il pendio orientale con tornanti poggiati su muri di sostruzione o sul banco litico, fino a raggiungere la porta principale di accesso alla città. Una seconda porta si apriva a Sud. Le due porte risalgono con certezza al momento della fondazione, come documenta anche la biografia del pontefice Leone IV³⁰. Rimangono ancora in elevato vari tratti della cinta muraria per un totale di 740 metri. La cinta, che conta sette torri, rispecchia nel suo percorso le scelte del progetto di fondazione e si adegua perfettamente alle curve di livello e all'orografia della collina.

La sua planimetria dunque (Fig. 8) non presenta elementi "geometrizzanti" che risulterebbero come delle forzature. Le strutture murarie che oggi emergono nell'abitato sono il frutto delle campagne di scavo che si susseguono ormai dal 1994. Queste hanno interessato il settore sud-orientale a partire dalla porta e la sommità della collina e hanno restituito un quadro urbano che consente di delineare una prima ricostruzione delle linee progettuali di età carolingia e degli interventi dell'età comunale.

27 Duchesne 1955, p.131

28 Il dato, presente in tutta la documentazione su Cencelle, è stato smentito dalle ultime acquisizioni nel corso delle quali misure effettuate con GPS differenziale hanno situato la quota qualche metro più in basso. In ogni caso tali dati andranno verificati nelle prossime campagne.

29 *"Si deve scoprire se c'è a disposizione della pietra, già tagliata o facilmente estraibile, in modo che non sia necessario trasportarla da una lunga distanza a grande rischio. Si deve anche scoprire se il legname deve essere trasportato da molto lontano o attraversando terreno difficile, così che sia pressoché impossibile averlo a portata di mano per la costruzione"*
Dennis 1985 pp. 31-37

30 Duchesne 1955, p. 131



Fig. 8. La collina e i resti di Cencelle in una foto aerea da Sud-Ovest

La rete stradale sin dalla fondazione ha come asse principale la via che dalla porta orientale sale verso la sommità della collina (Fig. 9) andando da Est a Ovest e che, presumibilmente, potrebbe incrociarsi con la via che entrava dalla porta meridionale. È in questo punto che si trova la *platea maior*, in una posizione di cesura fra il polo religioso e il polo del potere civile, attestata anche dalla sua larghezza, che consentiva il passaggio di due carr³¹.

Nel settore sud-orientale, corrispondente al Settore III dell'area di scavo, è stata individuata un'altra via parallela alla principale, anch'essa basolata e riconducibile al progetto iniziale della città.

31 Come verrà codificato nel secolo XII nella legislazione di Enrico I d'Inghilterra. Cfr. Guidoni 1991, p. 41.



Fig. 9. La *via gradata* che attraversa la città da Est a Ovest

Questa, nella fase comunale, conduce su una piazza caratterizzata dalla presenza di una cisterna; da qui, una via secondaria, più stretta con andamento Sud/Nord conduce verso la via principale. Vari assi stradali con lo stesso orientamento sembrano indicare per una parte dell'impianto viario uno schema pseudo-ortogonale, pur con le dovute anomalie e condizionamenti derivati dall'orografia della collina. Un'ulteriore strada in salita, dalla porta orientale conduce verso Sud e verso Nord seguendo l'andamento delle mura. Superata la porta orientale ci si trovava quindi davanti ad un trivio che consentiva l'immissione nello spazio urbano in tutte le direzioni. Il complesso episcopale era dunque situato sulla sommità della collina, mentre il quartiere sud-orientale era quello dell'edilizia abitativa, in pietra o in legno, quest'ultima testimoniata dalla presenza di buche di palo rinvenute in fase di scavo. Perché un evidente complesso episcopale? Insieme alla popolazione si era trasferito anche il vescovo della *Centumcellae* romana, Domenico, che forse era già presente nella nuova sede dal momento che il complesso episcopale mantenne la stessa dedica a San Pietro che aveva l'antica cattedrale

della *Centumcellae* romana. Dai documenti appare che Domenico ebbe una reggenza vescovile di lungo periodo. Da qui si può ricondurre a lui l'organizzazione dell'*insula episcopalis* che le indagini archeologiche stanno rimettendo in luce. Il complesso si trovava sulla sommità della collina nella sua estremità meridionale. A ridosso della cinta muraria e della cattedrale stessa, fu organizzata l'area funeraria con sepolture di tipologie diverse, sia in fosse scavate direttamente nel banco roccioso sia in sarcofagi monolitici o costruiti con lastre (Cfr. Figg. 3-4). A ridosso dello spazio funerario si collocava l'edificio del battistero. Sia il cimitero sia il battistero furono obliterati dalla costruzione della basilica romanica, all'inizio del secolo XII, in cui fu mantenuta la funzione battesimale e la destinazione funeraria sia all'esterno sia all'interno. A Est del battistero si trovava una torre, divenuta poi il campanile della chiesa romanica. All'interno dell'aula cultuale, rinvenuta nelle ultime campagne di scavo, è stata recuperata parte dell'arredo liturgico, un centinaio di frammenti litici decorati dai consueti motivi di età carolingia, riutilizzati nelle strutture e nella pavimentazione della chiesa romanica. Una seconda chiesa dedicata a San Leone Magno, menzionata nel documento di fondazione della città, non è stata ancora rintracciata. Entrambe le chiese, al momento della fondazione furono dotate di ricche suppellettili e libri sacri³². La grande ricostruzione della città in età comunale ha cancellato quasi totalmente l'insediamento altomedievale. Le uniche tracce restano incise nella roccia particolarmente friabile, che fu lavorata, in particolare nel Settore II del quartiere sud-orientale, mentre alcune buche di palo indicano la presenza di strutture lignee. Sempre nel Settore II, una struttura lignea semiellittica è associata a una fossa scavata nel banco di trachite destinata probabilmente alla conservazione di granaglie e documenta la funzione abitativa della struttura. Nello stesso settore i dati stratigrafici permettono di attestare la presenza di edilizia lignea almeno fino al XI secolo, quindi in contemporanea con le strutture in pietra. Oggi il

32 Duchesne 1955, p. 132

paesaggio urbano mostra le consistenti fasi di ristrutturazione che si sono susseguite dal XII al XIV secolo. I settori indagati hanno restituito nel quartiere sud-orientale case torri, isolati con case a schiera, impianti artigianali con forge per la lavorazione del metallo e botteghe per il commercio dei loro prodotti. Sulla sommità della collina il polo religioso ha mantenuto la sua funzione fin dal momento della fondazione. Questo, sulla *platea maior*, è preceduto da un insediamento delimitato da un lungo muro che racchiude una torre di avvistamento, e una casa torre, nucleo iniziale di un articolato complesso edilizio (Fig. 10).

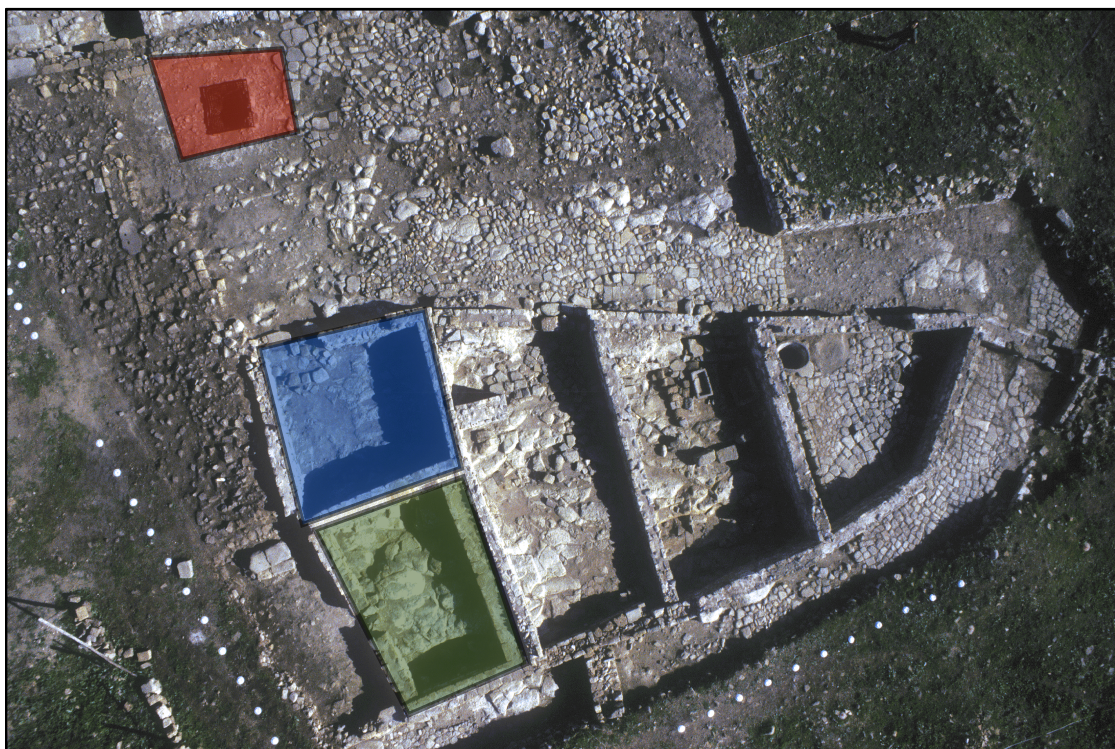


Fig. 10. Il complesso edilizio di case a schiera che comprende all'estremità una torre (in blu) e una casa-torre (in verde), prospiciente la piazza con cisterna (in rosso)

Dunque Cencelle, che al momento testimonia l'impianto tipico di una città comunale, lascia intravedere le scelte insediative della Leopoli carolingia, con una particolarità che la rende ancora più unica da un lato e dall'altro pone seri ostacoli alle indagini archeologiche: in età comunale, per ampliare gli spazi, soprattutto quelli abitativi, si scava asportando gli strati altomedievali e riutilizzando i materiali. Il caso di Cencelle, oltre che una fotografia di una città di età comunale che non ha subito alterazioni, si

può definire una stratigrafia al contrario, completamente capovolta, dove i materiali più recenti sono in basso mentre quelli più antichi si trovano in alto, affiorando nelle murature e nelle suppellettili, spesso riutilizzati. Da un lato è una situazione senza dubbio unica e affascinante, dall'altro, lo studio della stratigrafia, delle preesistenze e delle strutture è reso molto più complesso da questa situazione. Questo spiega anche la carenza di dati, soprattutto di quelli più antichi, che testimonino l'assetto della città all'epoca della sua fondazione.

1.3. Metodi e tecniche di scavo: un'overview dal 1994 a oggi

Dal 1994 le indagini archeologiche proseguono nell'ambito del progetto attuato, diretto e in gran parte finanziato dall'Università di Roma "Sapienza", in collaborazione con l'Università di Chieti "G. D'Annunzio" e l'Università della Tuscia, nei primi anni con *l'École Française de Rome* e con l'Università di Perugia³³.

La prospettiva di scavare integralmente e dall'inizio una piccola città medievale abbandonata da secoli, ha offerto inedite possibilità di verificare, alla luce dei risultati progressivi dell'indagine archeologica, la connessione fra dati storici, situazione urbanistica e stratificazione materiale. Ma mentre la situazione geotopografica è rimasta immutata nei secoli del medioevo, le strutture difensive esterne sono state integrate, risarcite e ammodernate negli ultimi secoli di vita dell'insediamento³⁴. Tenendo presenti tali presupposti, si è proceduto a uno scavo sistematico svoltosi in una o più campagne annuali, che prendesse avvio dalla ricerca archeologica ma che avesse anche come obiettivo a lungo termine l'individuazione e la proposta di fattibilità di un bacino archeologico. Nei primi anni di scavo è stato avviato, parallelamente all'attività del cantiere di scavo archeologico, anche lo studio topografico del territorio circostante, in modo da ipotizzare l'articolazione del contesto in cui si è

33 Ermini Pani 2007
<http://medieval-europe-paris-2007.univ-paris1.fr/Fr.htm>

34 Leopoli-Cencelle II 1996, pp. 10-11

inserita la fondazione dell'abitato e si è svolta la sua esistenza fino alla fine del XV secolo. L'oggetto di questo studio sono stati i 320 km² intorno al colle, considerando non i confini amministrativi dei vari comuni interessati, ma il bacino idrogeografico della Bassa Valle del fiume Mignone. Già nel 1999 si parlava della costruzione di “una banca dati aggiornata e integrabile in qualsiasi momento, utile a una conoscenza e comprensione storica del territorio in esame, che ne consenta una piena valorizzazione e una più efficace tutela”³⁵. Non è noto a quale tipo di piattaforma si pensasse per la banca dati, probabilmente una resa in forma digitale, ma non è dato sapere se si avesse già idea delle modalità. L'attività di scavo, svolta con metodo stratigrafico tradizionale, è stata documentata con supporti cartacei e con l'ausilio di una stazione totale negli ultimi anni. A integrare la mole di dati ha contribuito, in fase di identificazione delle aree da scavare, la fotointerpretazione archeologica³⁶, utilizzata per visualizzare eventuali anomalie del terreno e quindi la presenza di strutture obliterate. In una seconda fase si è passati al rilievo topografico, che nei primi anni di scavo ha permesso di elaborare una planimetria in scala 1:2000 del sito. Sin dall'inizio dello scavo, infatti, è stata creata una rete geodetica di inquadramento. Le operazioni di rilievo, dal 1994 al 1996 sono state effettuate con una stazione totale Nikon LG20A, all'avanguardia per l'epoca. Negli ultimi anni si è passati invece a una Stonex STS, attualmente in uso sullo scavo, mentre per le ultime acquisizioni effettuate nel mese di ottobre si è

35 Leopoli-Cencelle I 1999, pp. 7-9

36 “Permette di rinvenire antiche città borghi rurali, castelli e fortificazioni, strade e porti e a dare un quadro della situazione del patrimonio archeologico non visibile in superficie o irreparabilmente perduto. Attraverso foto aeree oblique o zenitali”. (Leopoli-Cencelle II 1996, p. 14)

utilizzato un ricevitore GPS differenziale RTK Altus³⁷, messo a disposizione dall'Università di Lund (Fig. 10bis). Fra i metodi utilizzati sin dall'inizio dello scavo, per l'acquisizione e il rilievo figura anche la fotogrammetria. Per la cartografia infatti, si sono utilizzati sistemi per l'acquisizione numerica dei dati derivati da foto aeree. Grazie alla triangolazione aerea si sono determinate le coordinate dei punti fotografici. La struttura dei dati archeologici acquisiti è stata progettata in modo da fornire una sistematizzazione degli elementi cartografici secondo uno schema interpretativo che distinguesse strutture murarie, infrastrutture ed elementi fuori posto. Si è organizzata quindi una banca dati che contenesse informazioni grafiche e numeriche in diversi livelli, relativamente agli edifici, alla viabilità, alla vegetazione, all'orografia e all'idrografia, alla toponomastica, ma anche ai percorsi del sito e alle attrezzature stabili e provvisorie³⁸.



Fig. 10bis. Il ricevitore GPS differenziale RTK Altus utilizzato nella campagna di scavo 2012

37 "Altus Positioning Systems is one of the first companies to feature L-Band corrections from TERRASTAR in their products. The TERRASTAR services were launched at Intergeo 2012 in Hannover Germany, and Altus exhibited two products with TERRASTAR compatibility. For portable use, the APS-3L features RTK & TERRASTAR to achieve 10 cm accuracy without local base stations or network. For installed applications, the APS-U also features TERRASTAR to deliver 10 cm accuracy in addition to GNSS Heading and RTK".

<http://www.altus-ps.com/>

38 Leopoli-Cencelle II 1996, pp. 14-15

2. DOCUMENTAZIONE

Uno scavo archeologico è una situazione dinamica, in continuo divenire, nella quale vengono svolte contemporaneamente operazioni differenti, tutte volte a ottenere gradualmente una conoscenza quanto più possibile completa del passato. Nel corso dello scavo generalmente il processo di acquisizione di nuovi dati fa scaturire varie discussioni sulle ipotesi possibili. Concretizzare un'ipotesi facendo in modo che questa prenda forma costituisce un'opportunità per esaminarla e verificarne la validità. Presentare dei dati quanto più possibile chiari, decifrabili e facilmente visualizzabili è un valore aggiunto per la documentazione stessa, per la ricerca e per il dibattito. In un tale contesto, avere a disposizione una documentazione tridimensionale di cui si possa disporre anche in seguito, può produrre enormi benefici in termini di tempo, di lavoro e anche di costi, alla ricerca archeologica. Mentre il 3D ha preso piede ormai da diversi anni nel campo della comunicazione museale e in quella dei Beni Culturali in generale, il dibattito sul suo utilizzo in fase di scavo e nel corso della raccolta dei dati, è solo all'inizio. Utilizzare la modellazione 3D nella ricerca archeologica può portare senza dubbio alla creazione di un nuovo livello nella comprensione del contesto. Integrare la visualizzazione 3D dei dati in un contesto di scavo, notoriamente soggetto a limiti di tempo e di budget, non è semplice, soprattutto considerando il fatto che bisognerebbe aggiungere una fase ulteriore al flusso di lavoro già complesso e spesso affetto da fattori logistici, organizzativi, naturali e meteorologici. Una tale modifica andrebbe quindi apportata in maniera graduale soprattutto considerando che spesso l'integrazione del 3D nel corso dello scavo significa, dal punto di vista della ricerca, dover investire in formazione e risorse ulteriori che per motivi di fondi, possono non essere disponibili. In Italia frontiere di questo tipo, sia per gli ostacoli già enunciati, sia per questioni legate alla proprietà intellettuale, appaiono ancora lontane, ma alcuni esempi, sempre più diffusi all'estero, fanno ben sperare. Per fare un esempio internazionale, Uppåkra, nel comune di

Lund nella Svezia del Sud, è uno scavo tuttora in corso, che sta riportando alla luce la città più grande e più ricca dell'Età del Ferro, con un'area urbana e una fervente attività artigianale sopravvissuta per più di un millennio, dal 100 a.C. al 1000 d.C. circa³⁹. Qui tutto ruota attorno alla comunicazione dei dati di scavo, sempre disponibile a studiosi e visitatori e quasi spettacolarizzata. È possibile, infatti, visitare lo scavo mentre gli archeologi sono al lavoro, usufruendo di applicazioni di realtà aumentata⁴⁰ che attraverso modelli 3D delle capanne, della *longhouse* e del paesaggio, rendono più semplice ai normali visitatori comprendere quali fossero le strutture che sorgevano in luogo delle numerose buche di palo. In un contesto come quello appena descritto, nel quale parte delle risorse viene investita in comunicazione per un pubblico di non addetti ai lavori, si aprono nuove strade per sperimentare tecniche di documentazione che prevedano l'unione di comunicazione e ricerca come attività integrate.

Senza dubbio c'è il bisogno che la documentazione venga "proceduralizzata" e organizzata in codifiche standard in modo che la visualizzazione possa essere accettata sia come contributo scientifico sia come oggetto di comunicazione, sull'esempio dell'esperimento all'avanguardia "*The London Charter*"⁴¹:

"Through extensive consultation with expert communities and the ensuing publication of successive drafts, The London Charter has had considerable success in acting as a catalyst for establishing international consensus on the principles that should inform best practice in heritage

39 <http://www.uppakra.se/>

40 Per Realtà Aumentata (*Augmented Reality*) si intende l'arricchimento della percezione sensoriale umana mediante informazioni, in genere manipolate e convogliate elettronicamente, che non sarebbero percepibili con i cinque sensi.

41 "*The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage was conceived, in 2006, as a means of ensuring the methodological rigour of computer-based visualization as a means of researching and communicating cultural heritage. Also sought was a means of achieving widespread recognition for this method. In 2006, Beacham, Denard and Niccolucci published a concise account of the origins and rationale of the London Charter, concentrating on the issue of 'intellectual transparency'.*" (Baker et al. 2012)
<http://www.londoncharter.org/introduction.html>

visualization across disciplines. It is now widely recognised as the de facto benchmark to which heritage visualization processes and outputs should be held accountable.”⁴²

Per la prima volta “*The London Charter*” esprime il bisogno dell’elaborazione di un formato standard che possa portare alla visualizzazione di “paradati”⁴³ in maniera trasparente, ma che allo stesso punto possa raggiungere una ricchezza e una linearità di comprensione tale da poter essere paragonata a un esercizio narrativo.

In uno scavo ricco come quello di Cencelle, la possibilità di rendere *open* e visualizzabili i dati in tempo reale richiederà senza dubbio tempi lunghi e l’elaborazione di una piattaforma che renda standard le operazioni di raccolta e di codifica. Da qualche anno si è iniziata un’operazione di digitalizzazione, mentre per il 2014 è prevista una mostra itinerante per mostrare al pubblico i risultati di quasi due decenni di scavo.

2.1. Il trattamento e la conservazione dei dati a Cencelle nel corso degli anni

Sin dall’inizio dello scavo, sono state elaborate apposite schede che avevano come fine una sistematica e unitaria documentazione e che permettessero di catalogare, oltre alle singole unità stratigrafiche, anche le unità murarie e i manufatti. Di seguito si presenta una panoramica sui metodi di catalogazione e conservazione dei dati a Cencelle, alcuni approntati appositamente per le esigenze dello scavo, altri appartenenti al gruppo delle schede utilizzate solitamente sul campo per catalogare materiali e documentare murature.

⁴² Baker *et al.* 2012

⁴³ Paradata: “*Information about human processes of understanding and interpretation of data objects. Examples of paradata include descriptions stored within a structured dataset of how evidence was used to interpret an artefact, or a comment on methodological premises within a research publication. It is closely related, but somewhat different in emphasis, to "contextual metadata", which tend to communicate interpretations of an artefact or collection, rather than the process through which one or more artefacts were processed or interpreted*”.

<http://www.londoncharter.org/glossary.html>

- SACA (Scheda Abitazione Centro Abbandonato). Riguarda in modo specifico l'edilizia abitativa e si tratta di un supporto cartaceo. Nel 1999 si scelse di elaborare una scheda per focalizzare rapidamente l'osservazione sugli elementi principali, uniformando la terminologia e il metodo d'indagine e lasciando libertà di integrazione; tale procedura è tuttora in uso. È stata usata nelle aree non scavate per mettere in evidenza anomalie (anche con l'aiuto di foto aeree), registrare elementi che individuassero cellule abitative e nei settori di scavo per analizzare le singole abitazioni facilitando il processo ricostruttivo delle fasi. Nella scheda viene analizzato il grado di conservazione della struttura e la sua posizione. Si esegue uno schizzo planimetrico che in mancanza di un vero rilievo consenta di acquisire le prime informazioni sulla forma dell'abitazione; in seguito si descrive la casa iniziando dagli elementi strutturali dell'edificio; infine, in una sezione di carattere più specificatamente stilistico, si descrivono le aperture (porte e finestre). Completa la scheda un'analisi dei servizi (approvvigionamento idrico, scorrimento delle acque piovane, smaltimento dei rifiuti, conservazione delle derrate, presenza di forni, ecc.) e degli arredi da mettere in connessione con i muri in fase di scavo. L'ultima parte della scheda è riservata all'analisi archeologica della tecnica muraria⁴⁴.
- Scheda per il Materiale Metallico. Dal momento che i metalli richiedono metodi e strumenti diversi da quelli solitamente utilizzati nello studio di altri manufatti, fra il 1995 e il 1997 è stata ideata e messa a punto una scheda che permettesse di catalogarli quando rinvenuti nello scavo. La scheda comprende voci come: "classe e sottoclasse", "oggetto", "materiale", "tecnica di lavorazione", "strumento con cui è stato eseguito", "luogo di ritrovamento", "posizione alla scoperta", "stato di conservazione", "alterazione del metallo", "misure", "descrizione",

44 Leopoli-Cencelle I 1999, pp. 10-11

“destinazione e modalità d’uso”, “luogo di produzione”, “bibliografia”, ecc.⁴⁵.

- Scheda per il Materiale Ceramico. Si tratta della prima scheda informatizzata nel corso dello scavo di Cencelle, è stata realizzata con DB File Maker Pro (Fig. 11) e comprende varie voci che definiscono per il manufatto ceramico, classe, materiali, caratteristiche fisiche, misure ecc.⁴⁶.

Fig. 11. La Scheda informatizzata per il Materiale Ceramico

- Scheda per il Materiale Fittile da Costruzione. La necessità di catalogare e affrontare lo studio della grande quantità di materiale fittile da costruzione (e soprattutto da copertura) che lo scavo di Leopoli-Cencelle riporta alla luce, ha condotto alla decisione di prendere in esame i materiali globalmente, senza campionature, per poter fornire dati realistici sulle tipologie, sugli impasti e sulla loro diffusione all’interno dello scavo. L’oggetto viene dapprima descritto, poi contestualizzato⁴⁷.

45 Leopoli-Cencelle I 1999, pp. 14-19

46 Leopoli-Cencelle I 1999, pp. 20-23

47 Leopoli-Cencelle I 1999, pp. 24-27

Il materiale -prevalentemente cartaceo- raccolto nel corso delle campagne di scavo che si sono succedute, è attualmente oggetto di una catalogazione informatizzata che negli ultimi anni è divenuta sistematica alla fine di ogni campagna di scavo. Il valore aggiunto che si propone col presente lavoro è la possibilità di integrare nello scavo l'informatizzazione del dato in 3D, documentando in tempo reale strati, strutture e manufatti, che potrebbero andare incontro a usura in brevissimo tempo, compromettendone la corretta documentazione e contestualizzazione.

2.1.1. Documentazione - Un primo esperimento di Laser Scanning a Cencelle

Quando nel corso delle campagne di scavo condotte fra il 2006 e il 2008 venne alla luce la chiesa basso-medievale, proprio di fronte agli edifici di rappresentanza della città di Cencelle, ci si accorse che si trattava di una edificio dalle caratteristiche eccezionali: l'abside della chiesa era costruita a ridosso della cinta muraria e la facciata era orientata a Nord⁴⁸. La struttura, datata alla fine dell'XI secolo, era stata costruita con blocchi di tufo squadriati dalla forma regolare, mentre nella tipologia ricordava la chiesa di San Pietro a Tuscania⁴⁹. Considerata la rilevanza di una tale struttura, questa divenne (ed è tuttora) il fulcro delle attività di ricerca di carattere strutturale e topografico condotte da una équipe di topografi dell'Università "La Sapienza" di Roma⁵⁰. Data l'entità della scoperta si optò per una svolta tecnologica rispetto alle tecniche di documentazione adottate sullo scavo sfruttando un progetto di cooperazione fra l'università

48 Generalmente l'abside è rivolta a Est.

49 Ermini Pani 2003

50 Il team venne selezionato ai fini di sviluppare un progetto di cooperazione fra il 2006 e il 2008 tra il dipartimento di Scienze Storiche, Archeologiche e Antropologiche della Sapienza e Leica-Geosystems, coordinato dal Dr. Corrado Alvaro.

e Leica-Geosystems⁵¹. La finalità ultima era creare un modello 3D usando dati esatti e affidabili ottenuti combinando un *laser scanner* con la documentazione tradizionale⁵². L'uso di un *laser scanner* permetteva di risolvere problemi legati alla precisione di misura e rappresentare oggetti per i quali la restituzione grafica è estremamente complessa. Ma la rappresentazione, usata come un mezzo per interpretare le strutture, per quanto accattivante possa essere, non può mai prescindere dalla percezione umana data dalla connessione fra occhio e cervello. Il fine ultimo del progetto⁵³ portato avanti fra il 2007 e il 2009, era sottolineare il bisogno di combinare tecniche differenti di acquisizione e rilevamento per ottenere i migliori risultati in termini di documentazione ed interpretazione del contesto. La cripta appartenente alla chiesa medievale di Cencelle, (Fig.12) che si prestava perfettamente a questo scopo, richiese l'integrazione di tecniche differenti di rilievo e misurazione (misurazione manuale, stazione totale, ortofoto⁵⁴, GPS, *laser scanning*).



Fig. 12. La Cripta della chiesa medievale di Cencelle vista dall'alto e dall'interno

51 "Leica Geosystems, based in eastern Switzerland, produces products and systems for surveying and geographical measurement (geomatics). Its products employ a variety of technologies including GPS satellite navigation and laser rangefinders to enable users to model existing structures, terrains in computer based systems to high accuracies".

<http://www.leica-geosystems.it/it/index.htm>

52 Per questo esperimento si decise di acquisire la Cripta, date le condizioni di conservazione e le dimensioni dei volumi dell'ambiente.

53 Alvaro, Liberotti, Nepi 2009

54 Ortofoto: una fotografia aerea geometricamente corretta (cioè che ha subito procedimento di ortorettifica, "raddrizzata" in gergo) e georiferita.

Un'ulteriore finalità del progetto era quella di giungere a un metodo che permettesse di generare modelli digitali realistici, che riportassero anche le tracce di lavorazione dei manufatti litici o i danni riportati dagli edifici in seguito a eventi naturali o azioni antropiche. Come prima azione, la pianta originale della chiesa, disegnata in fase di scavo, fu analizzata e studiata, così da comprendere l'interpretazione data all'edificio dagli archeologi. In una seconda fase, dopo aver acquisito il disegno con uno scanner ad alta risoluzione, si passò alla vettorializzazione⁵⁵ della pianta utilizzando AutoCAD (Fig. 13).



Fig. 13. La pianta vettorializzata dell'area della chiesa

In precedenza era già stata condotta un'indagine topografica nell'area della chiesa, per georeferenziarne il perimetro, utilizzando una Stazione Totale Leica TPS 1203. I punti ottenuti con la stazione totale furono allineati alla pianta, disegnata a mano, che divenne la base per il modello 3D. Allineare le acquisizioni effettuate nella cripta che si trova a una quota più bassa, con la chiesa che si trova al culmine della collina, fu all'epoca la parte più complessa del lavoro (Fig. 14).

⁵⁵ Vettorializzazione: Trasformazione di un'immagine composta da Pixel in un disegno composto da linee e segmenti.



Fig. 14. L'operazione di allineamento delle acquisizioni della chiesa e della cripta

Dato l'ottimo stato di conservazione della cripta e la mole di dati disponibili nella chiesa, si pensò di usare tale ambiente per confrontare due scanner differenti: il primo un Leica ScanStation 2⁵⁶ per la chiesa e il secondo un Leica HDS 6000⁵⁷ per la cripta. Il primo acquisisce dati a 360° permettendo di catturare tutta la geometria, verticale, orizzontale e a una quota più bassa. È dotato inoltre di una fotocamera digitale integrata che permette di acquisire anche una *color map* in cui a ogni punto acquisito viene associato nel *render* finale il suo colore reale. La decisione di scegliere questo tipo di scanner per un'area come quella della chiesa fu dettata dalle dimensioni di quest'ultima, che si estende per 300 m². Il secondo scanner, con un *range* di 500.00 punti/s, fu utilizzato per la cripta, in modo da ottenere dati di qualità migliore. In seguito i dati di

56 "Leica ScanStation 2 high speed laser scanner's applications include engineering, architectural and topographic surveys, industrial plant as-builts, measuring material quantities and volumes, forensic analysis, historical archiving, and highway & bridge surveys. This scanner provides full 360° x 270° field of view from a single scan for added site versatility and productivity. It is able to achieve single point positional accuracies to 6mm at 50m, with 300m maximum range. The Leica ScanStation 2 fires at 50,000 points per second".

http://www.leica-geosystemssolutionscenters.com/Site/product_3dls_ScanStation2.html

57 "The Leica HDS6200 offers scan control panel, data storage, and battery integrated into a single unit. Higher accuracy for each single point measurement and greater precision. Maximum scan rate up to 1 Mpoints/second. 79m range, based on ambiguity interval. Three scanner control options: integrated side panel, wireless PDA, or full laptop control using Leica Cyclone software. High scan density".

http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-HDS6200_64228.htm

chiesa e cripta furono integrati. Per georiferire i dati da *laser scanner*, furono utilizzati come riferimento i *target* riflettenti⁵⁸ della stazione totale, così che fosse possibile riferire le coordinate delle 20 nuvole di punti (7 nella cripta e 13 nella chiesa) al sistema di coordinate ottenuto con la stazione totale. Nell'ultima fase i dati *raw* vennero importati nel software Leica Cyclone 5.8. (Fig. 15).

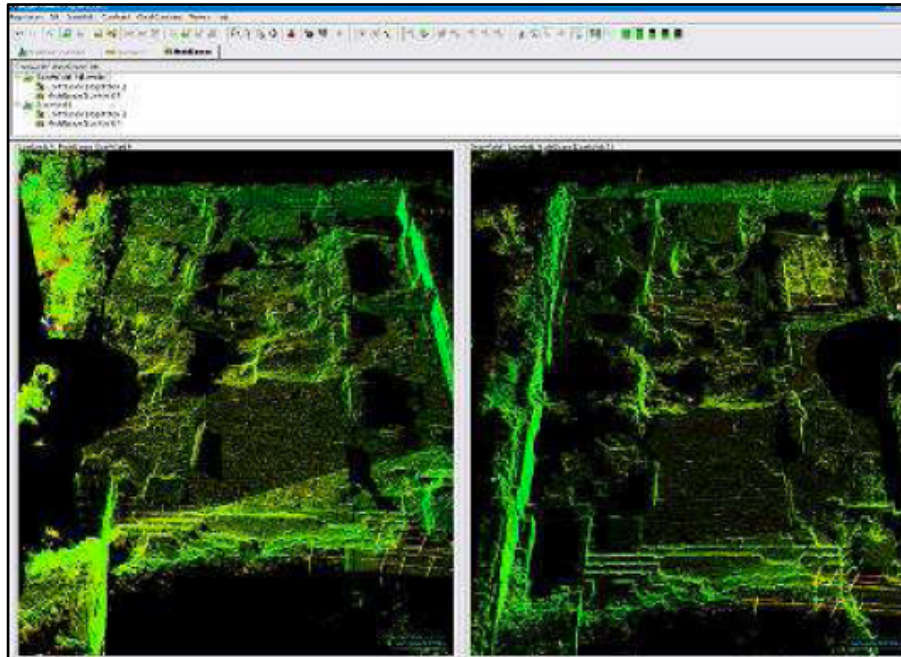


Fig. 15. La nuvola di punti ottenuta dalle scansioni effettuate nella chiesa

Nella fase di *post-processing*, i dati acquisiti con i due laser scanner furono decimati⁵⁹. Il risultato finale fu una nuvola di oltre 500 milioni di punti per la cripta e 174 milioni di punti per la chiesa. Per quanto riguarda la HDS 6000 fu necessario allineare manualmente le nuvole di punti basandosi sulla posizione dei *target* riflettenti. Infine fu modellata una *mesh* ad alta risoluzione generata per le parti più significative dell'architettura (Fig. 16) mentre per l'intera cripta la *mesh* fu decimata per poter muovere agevolmente il modello.

58 Si vedrà nei capitoli seguenti che nelle acquisizioni effettuate in Ottobre 2012 con uno scanner Faro, non c'è stato bisogno di *marker* riflettenti, ma le stesse strutture o sassi posizionati ad hoc sono stati utilizzati come riferimenti per l'allineamento.

59 La "decimazione" consiste nel ridurre il numero di punti, in base al livello di dettaglio necessario per la visualizzazione.

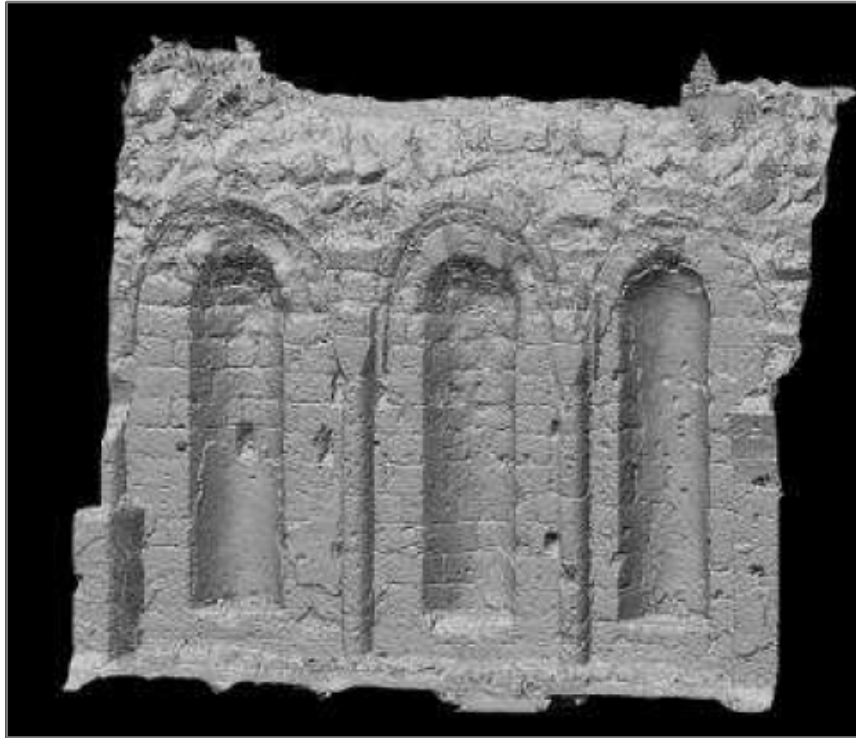


Fig. 16. La *mesh* generata per visualizzare parti significative dell'architettura della cripta

Per estrarre i vari profili dell'edificio fu usato AutoCAD Map3D di Autodesk. Per la prima volta fu generato un modello 3D di un edificio di Cencelle, a questo scopo fu usato 3Ds Max di Autodesk⁶⁰. Posizionando le luci in corrispondenza delle aperture si cercò di ottenere un *render* quanto più realistico possibile (Fig.17) mantenendo inoltre tutte le asimmetrie nell'allineamento dei muri, mentre l'elevazione della cripta fu resa in trasparenza dal momento che non era nota dai dati di scavo⁶¹.

60 "Autodesk® 3ds Max® software provides a comprehensive 3D modeling, animation, rendering, and compositing solution for games, film, and motion graphics artists".
<http://www.autodesk.com/products/autodesk-3ds-max/overview>

61 Alvaro, Liberotti, Nepi 2009



Fig. 17. Il modello 3D della cripta realizzato con 3Ds Max nel 2009 in seguito alle acquisizioni con *laser scanner*

2.1.2. Alcune osservazioni e un esperimento

Oggi, a distanza di qualche anno e considerando l'evoluzione rapidissima delle tecnologie per l'acquisizione tridimensionale, allo stesso tempo comprendendo che la scarsità di risorse economiche tipica di uno scavo universitario abbia portato a sfruttare al massimo le tecnologie messe a disposizione gratuitamente da Leica, si potrebbe sommessamente osservare che l'utilizzo di uno scanner come il Leica ScanStation2 sarebbe stato più appropriato in un interno provvisto di volta; magari la cripta, chiusa da muri perimetrali, sarebbe stato il luogo più adatto per le acquisizioni con questo strumento. Per un ambiente sì ampio, ma nel quale i dati fondamentali da acquisire sono in piano, sarebbe stato più indicato uno strumento LiDAR⁶², ma riconoscendo i limiti legati al costo elevato di uno strumento del genere, la soluzione ideale al momento, con risultati altrettanto accurati e scalabili, potrebbe essere la *Computer Vision*. Esempi di applicazione di questa tecnica per l'acquisizione di "ortofoto" dettagliate si fanno sempre più frequenti. Fra questi la

62 "LiDAR (*Light Detection and Ranging*) is an optical remote sensing technology that can measure the distance to, or other properties of, targets by illuminating the target with laser light and analyzing the backscattered light". <https://en.wikipedia.org/wiki/LiDAR>

Un *laser scanner* montato su un "drone" (UAV), un oggetto volante comandato a distanza, che permette di acquisire e georiferire l'area sorvolata.

documentazione dall'alto dell'Anfiteatro di II secolo d.C. di *Carnutum* eseguita con un "microdrone"⁶³ radiocomandato e utilizzando PhotoScan per trattare le 40 immagini acquisite e generare un modello 3D della vista dall'alto ⁶⁴ (Fig.18).

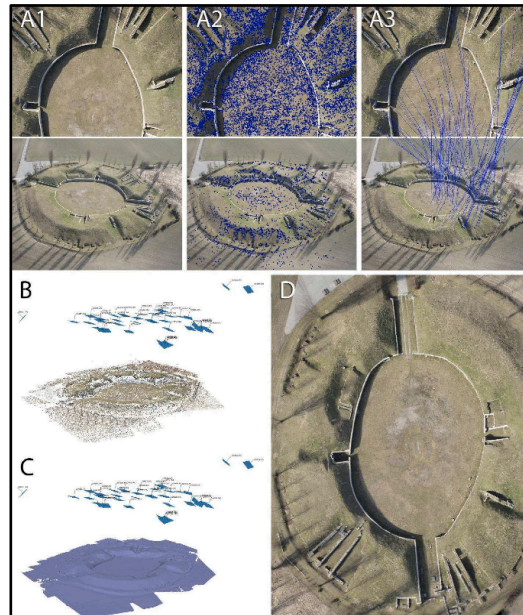


Fig. 18. Le fasi della creazione di un'ortoimmagine del teatro di II secolo della città romana di *Carnutum*

Un problema riscontrato sia nell'articolo citato sia nel lavoro sul campo condotto da chi scrive è la difficoltà di confrontarsi direttamente con chi ha scavato per comprendere meglio i dati cartacei: questo potrebbe portare a formulare ipotesi legate allo stato in cui si trova la struttura, senza aver modo di valutare come questa fosse al momento dello scavo. Un altro ostacolo, superabile in caso di distanza non eccessiva del sito, è l'impossibilità, nel momento di processare i dati, di avere di fronte la struttura in modo da verificare e integrare eventuali parti mancanti. A tale proposito si propone una soluzione alternativa, dai costi assolutamente ridotti. Nel corso della campagna di acquisizioni condotta nel mese di Ottobre 2012, concentrata prevalentemente sui quartieri residenziali di Cencelle, si è pensato di acquisire fotograficamente anche la cripta per

⁶³ Un elicottero radiocomandato provvisto di fotocamera.

⁶⁴ Verhoeven *et al.* 2012

poi processare le immagini utilizzando PhotoScan. 81 immagini sono state acquisite con una fotocamera Canon EOS 550D con obiettivo grandangolare sia all'interno della cripta sia dall'alto, dal livello della chiesa. Il risultato del *processing* automatico, che ha richiesto circa 6 ore, è una *mesh* di qualità media (Fig. 19) non metrica, ma scalabile (per ottenere una *mesh* facile da ruotare e non troppo “pesante” in termini di poligoni e quindi di livello di dettaglio, sono stati impostati come *settings* “average” per la risoluzione e un numero massimo di 200.000 facce).

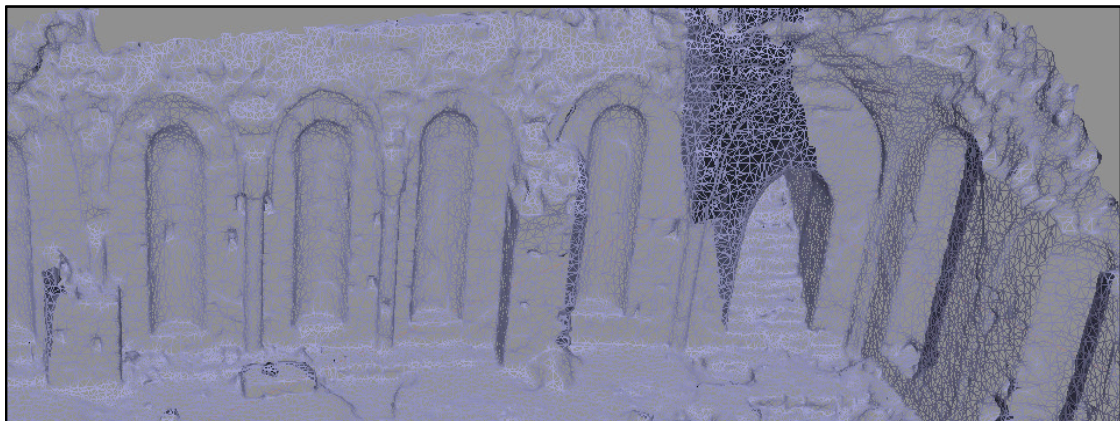


Fig. 19. Il modello della cripta, visualizzata come insieme di poligoni, ottenuto con PhotoScan

Il modello offre comunque un livello di dettaglio elevato dell'intero ambiente (Fig. 20) oltre che di pareti decorate o elementi architettonici particolari, come nicchie e capitelli.

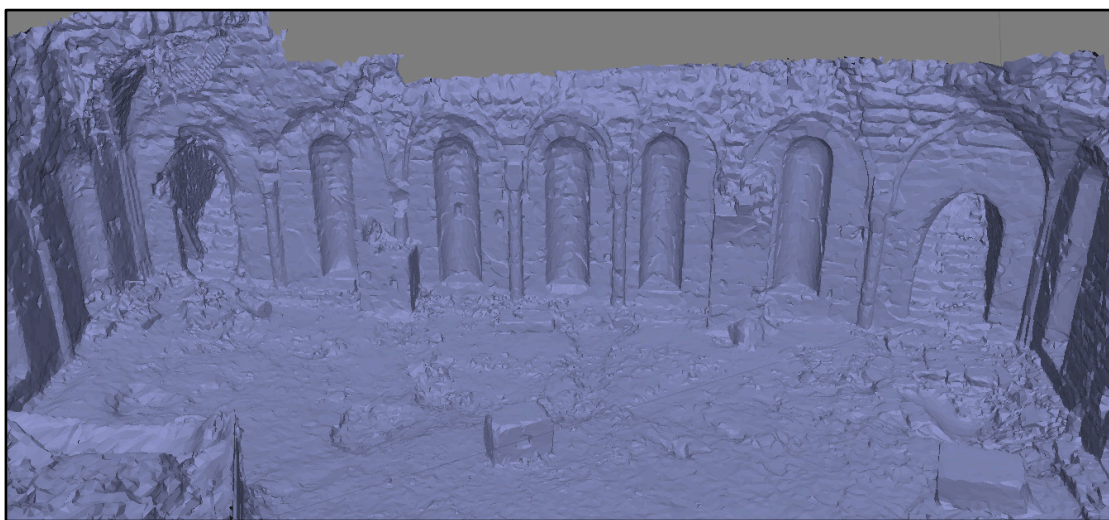


Fig. 20. Particolare del modello della cripta ottenuto con PhotoScan in versione “solid”

Il risultato è apprezzabile inoltre anche nella versione “texturizzata” (Fig. 21) del modello. In totale l’elaborazione dell’intera cripta con 81 immagini, ha richiesto circa 5 ore di calcolo.



Fig. 21. Il modello della cripta in versione “texturizzata”

Un valore aggiunto, offerto dalla *Computer Vision*, è la possibilità di acquisire particolari che il laser non riuscirebbe a cogliere come nel caso della cripta, i simboli e i disegni graffiti sull’intonaco delle nicchie probabilmente dai detenuti che soggiornarono in questo luogo quando, secondo alcune teorie, fu trasformato in una prigione⁶⁵ (Fig. 22).

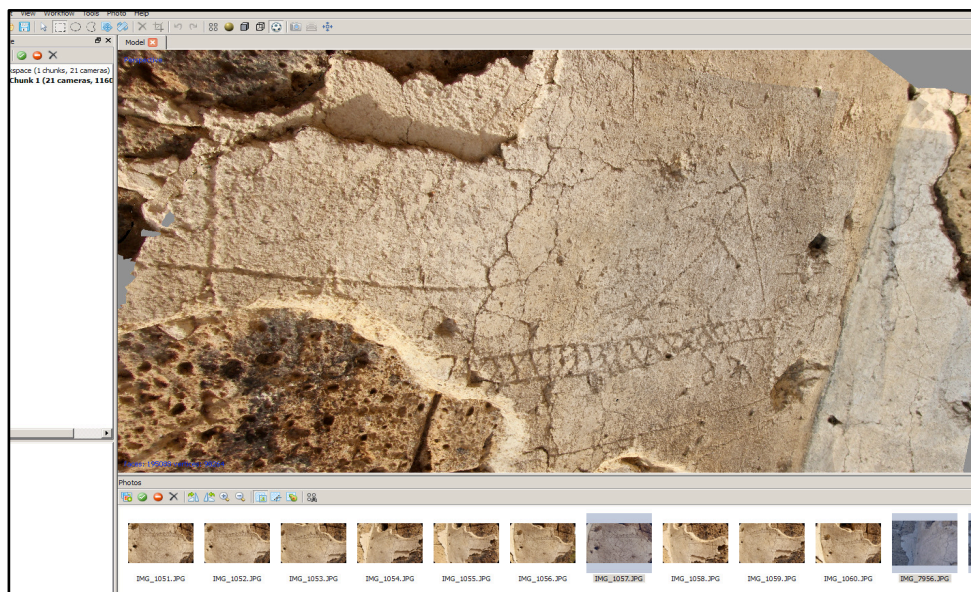


Fig. 22. Il risultato finale, “texturizzato”, dell’acquisizione dei graffiti

65 Stasolla 2012

Con sole 21 immagini (Fig. 23) e circa un'ora di elaborazione, si è ottenuto un risultato eccezionale che permette di fermare virtualmente il processo di deterioramento di questa preziosa testimonianza e che, trattato con altri filtri, potrà essere ancora meglio decifrabile.

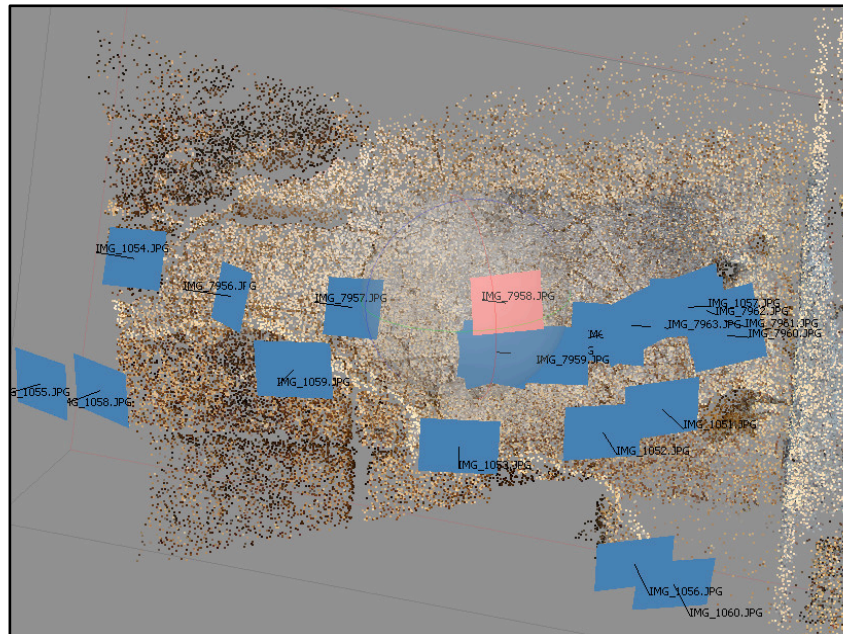


Fig. 23. Le posizioni della camera in PhotoScan e la nuvola di punti dei graffiti

Inoltre i particolari acquisiti in anfratti difficilmente raggiungibili possono essere allineati e integrati con l'architettura -dove sia richiesto un maggiore livello di dettaglio (Fig. 24)- sia che questa sia stata acquisita per mezzo di un *laser scanner*, sia utilizzando la *Computer Vision*.

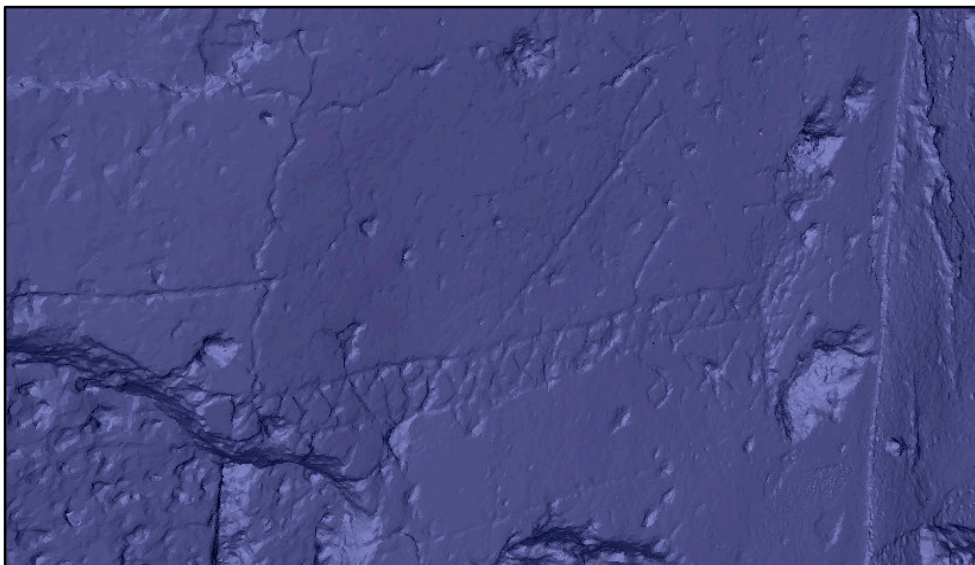


Fig. 24. Particolare delle tacche graffite in visualizzazione "solid"

In conclusione, l'acquisizione sul campo in tempo reale condotta integrando metodologie digitali con lo scavo tradizionale, si presenta oggi come la soluzione migliore per una comprensione completa che non ometta nulla di ciò che viene riportato alla luce giornalmente e permetta di elaborare deduzioni sul campo molto più affidabili delle ipotesi che si possono fare a distanza di anni basandosi quasi esclusivamente su immagini e documentazione cartacea.

2.2. Lo scavo in tempo reale: metodologie digitali integrate per la documentazione, l'analisi e la visualizzazione del dato archeologico

“Unlike traditional 2D technology, 3D reconstruction of deposits allows the archeologist to develop more complex understandings and analyses of the deposits and artifacts they excavate. Digging is a destructive technique: how can we reanalyze and interpret what we excavate? How to simulate an archaeological excavation with all the stratigraphy? And if we simulate virtually an excavation, how can different archaeologists collaborate in the same virtual space from different locations while sharing the same archaeological data? The digital recording does not per se solve all these issues if not supported by a robust methodological workflow⁶⁶”.

L'uso del 3D *embedded* -integrato- nelle tecniche stesse di scavo, sta lentamente prendendo piede ma al momento, nonostante l'esistenza di tecniche *low-cost*, è una prerogativa di ben pochi scavi, sia per l'assenza di formazione su queste tecniche, sia per la difficoltà di approccio da parte di archeologi più tradizionalisti. Eppure, usare il 3D può allo stesso tempo coinvolgere il pubblico nel processo interpretativo e favorire una comprensione più profonda del contesto archeologico. La possibilità di combinare acquisizioni da *laser scanner*, *Computer Vision*, modelli 3D, *3D repository* per la visualizzazione dei dati di scavo, aiuta a comprendere le relazioni tra le caratteristiche dell'edificio scavato o del reperto e l'interpretazione di cosa possa essere, di quale sia la sua funzione,

66 Forte *et al.* 2012 p. 354

offrendo anche al pubblico la possibilità di seguire il ragionamento degli archeologi. Dal punto di vista della ricerca, l'integrazione della visualizzazione delle varie ipotesi al lavoro sul campo fornisce una comprensione più profonda di un contesto archeologico, dalla quale il processo di scavo "*in progress*" non può che trarre vantaggi⁶⁷. Mentre come già enunciato, l'utilizzo di metodi e tecnologie 3D integrate per la documentazione dello scavo è ancora distante dall'essere proceduralizzato, molti sono stati gli esempi, negli ultimi anni, di integrazione di tecnologie e metodi tradizionali. Si tratta di modelli 3D e simulazioni, 3D Web, GIS, ecc. Generalmente quando si parla di tecnologie integrate per la visualizzazione tridimensionale del dato archeologico, l'idea prevalente è quella dell'interazione con modelli derivati dalla documentazione, piuttosto che direttamente con i dati stessi. Se si parte dalla documentazione pura, si ha a che fare nell'ordine con: ricostruzione della stratigrafia, acquisizione di manufatti, visualizzazione degli strati, interpretazione e contestualizzazione. Questi aspetti normalmente vengono documentati fotograficamente o su carta ma nei casi in cui si dispone di dispositivi automatici e software per la documentazione dello scavo, si arriva spesso all'eccesso opposto e si prescinde da domande di ricerca specifiche. Quando poi, l'uso di strumenti tecnologici sia connesso con attività episodiche⁶⁸ e non con il loro uso sistematico o con sistemi collaudati e autonomi, ecco che impostare un *workflow* che sia applicabile se non a tutte le attività, almeno al singolo scavo, diviene un'impresa quasi impossibile. Tutto ciò è comprensibile considerando che nel passato gli strumenti che permettevano di integrare tecnologie e documentazione erano molto costosi (e molti lo sono tuttora), richiedevano tempi lunghi per il trattamento dei dati e specialisti che fossero in grado di utilizzarli correttamente. Tutto ciò determinava difficoltà insormontabili nella

67 Ask 2012

68 Cfr. paragrafo 2.2.1.

digitalizzazione dei dati in tempo reale e nell'interpretazione di questi ultimi già nel corso dello scavo. Il *post-processing*, l'archiviazione dei risultati dello scavo e l'individuazione di una piattaforma digitale unica per la conservazione e l'accessibilità, costituiscono tuttora un ostacolo all'archeologia digitale⁶⁹. Eppure, grazie ai recenti progressi nella creazione di strumenti per generare, digitalizzare e soprattutto visualizzare dati, è possibile descrivere oggetti e ambienti in tre dimensioni con grande accuratezza, costi accessibili e senza avere alcuna particolare competenza per ciò che concerne la programmazione. Mentre finora un gran numero di applicazioni 3D in archeologia sono state prevalentemente connesse alla visualizzazione all'interno dei musei e al monitoraggio dei siti, ben poco è stato fatto per creare dati che aiutassero nell'interpretazione del contesto archeologico. La possibilità di definire un metodo standard per la creazione di dati tridimensionali in archeologia è ancora lontana, ma si sta iniziando a impostare programmi di ricerca sull'uso combinato di strumenti che possano produrre in tempo reale una documentazione avanzata, nonostante gli ostacoli che inevitabilmente ancora si incontrano in ambito archeologico. È ben noto che in uno scavo archeologico non è possibile prevedere quali saranno gli eventi che si succederanno, quindi ogni procedimento, ogni "*pipeline*" e ogni soluzione sarà differente da sito a sito. L'evoluzione dello scavo viene definita dalla relazione tra l'indagine sul campo e il processo di documentazione. Il risultato è un'interpretazione del contesto archeologico basata sull'analisi di tutti gli elementi raccolti durante il lavoro sul campo⁷⁰. Si tratta di dati soggettivi, legati alla capacità di un singolo archeologo (coadiuvato dal suo gruppo) di elaborare e analizzare dati di natura differente. Servono quindi degli elementi che affianchino e accrescano la capacità umana di elaborare le informazioni. Su uno scavo archeologico, ad esempio, è fondamentale la possibilità di poter visualizzare gli strati già distrutti

69 Forte *et al.* 2012

70 Dell'Unto *et al.* 2011

oppure elementi specifici come ossa o manufatti, nella loro posizione originaria e in relazione con lo scavo. Questo è esattamente ciò che permettono gli strumenti digitali utilizzati direttamente sul campo. La possibilità di acquisire un manufatto ancora *in situ*, come per esempio a Cencelle le numerose sepolture in prossimità della chiesa (Fig. 25), permette di monitorare, comparare e analizzare elementi che nel giro di poche ore potrebbero andare distrutti, sia per la natura intrinseca dello scavo sia per il naturale processo di deterioramento a cui materiali e manufatti delicati potrebbero andare incontro una volta scoperti. Dunque il problema fondamentale, al momento, non è di carattere tecnologico, ma prevalentemente logistico, legato alla volontà e alla possibilità di organizzare un *workflow* che renda la documentazione in 3D in tempo reale sullo scavo un'operazione di routine come può essere la documentazione cartacea e fotografica.

Lo scavo di Cencelle negli ultimi anni ha aderito con entusiasmo agli sforzi volti alla creazione di un tale processo. Nel corso della campagna di scavo condotta nel mese di Ottobre 2012, in collaborazione con l'*Institutionen för Arkeologi och Antikens Historia*, dell'Università di Lund, si sono svolti dei *workshop* (Fig. 31) con il fine di formare studenti e responsabili di scavo all'acquisizione tridimensionale in tempo reale dei dati⁷¹. Argomento dei *workshop* sono stati *Computer Vision* e in particolare PhotoScan e il *post-processing* con MeshLab. Nell'arco di una settimana di scavo, è stata documentata giornalmente la stratigrafia dell'area cimiteriale (Fig. 25) man mano che i numerosi scheletri venivano rimossi.

⁷¹ I laboratori proseguono nell'ambito delle attività della cattedra di Archeologia Medievale e si auspica a breve una completa integrazione di questi metodi nelle attività di scavo.

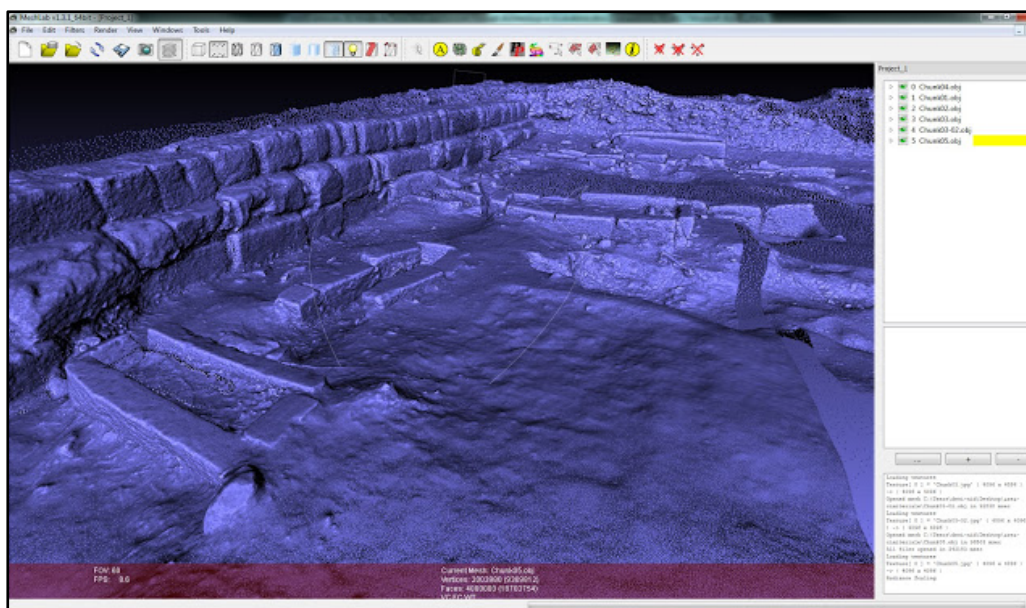


Fig. 25. L'area cimiteriale in prossimità della chiesa acquisita in *Computer Vision*

Mentre si acquisivano i dati a mezzo *laser scanner*, utilizzando il ricevitore GPS differenziale è stato rilevato il perimetro dell'area scavata, così da georiferire le sepolture e la posizione delle medesime. I dati ricavati sono stati processati con PhotoScan alla fine di ogni giornata di lavoro così da avere il dato tridimensionale della stratigrafia che andava distrutta quotidianamente (Fig. 26).

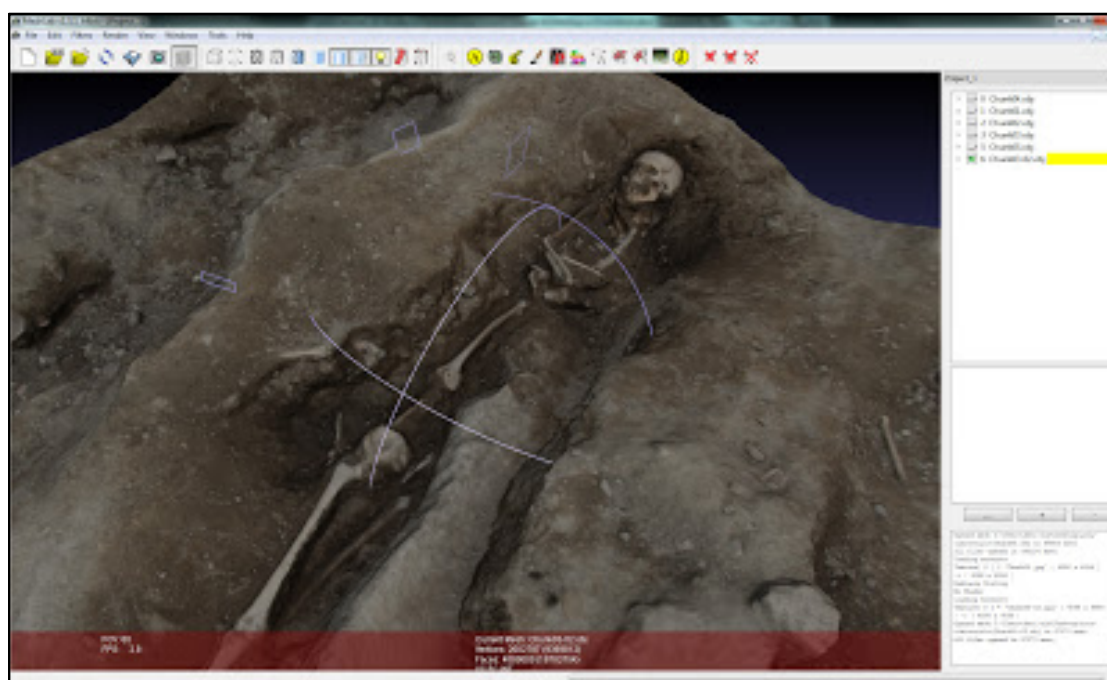


Fig. 26. lo scavo dell'area cimiteriale di Cencelle documentato giornalmente in *Computer Vision*

Infine, si sono ottenuti modelli scalabili georiferiti che, allineati con MeshLab, possono dare un'idea degli strati, della loro collocazione e dell'evolversi dello scavo. Introdurre un nuovo sistema nel corso del lavoro sul campo implica naturalmente lo stravolgimento di un metodo che è stato usato per decenni, pertanto va naturalmente affinato per definirne limiti e potenzialità. L'uso di tali software, seppure in forma limitata a Cencelle, ha prodotto per il momento ottimi risultati e si presta bene alla conformazione dello scavo. La possibilità di avere modelli 3D completi, utilizzabili nel corso dell'indagine sul campo, non solo costituisce un valore aggiunto, ma risulta un mezzo formidabile per visualizzare particolari che non sono più disponibili (come ad esempio gli scheletri o le sepolture stesse) e allo stesso tempo per trarre nuove conclusioni ed elaborare strategie sui metodi di scavo e documentazione da adottare.

2.2.1. Esempi di documentazione integrata: Uppåkra

Come già citato in precedenza, un esempio di tecnologie integrate per la documentazione 3D dello scavo è lo scavo di Uppåkra, 5 chilometri a Sud di Lund nella Svezia del Sud, dove questo metodo è stato utilizzato già dal 2010 con risultati assolutamente rivoluzionari che hanno permesso di creare modelli 3D per monitorare, comparare e analizzare la documentazione nel corso della campagna di scavo⁷². Nel corso della campagna di scavo condotta nel 1996 furono rinvenuti circa 20.000 reperti in oro, argento e bronzo che fecero pensare a un insediamento dell'Età del Ferro sopravvissuto in età pre-romana fino all'epoca Vichinga (intorno al 1000 d.C.). Da allora gli scavi in quest'area sono andati avanti portando alla luce tracce di strutture come capanne e una *longhouse*⁷³. Oltre a ospitare visite guidate (di cui si è già parlato) che permettono di osservare gli archeologi al lavoro, il sito di Uppåkra è diventato un caso di

72 Dell'Unto *et al.* 2011

73 Un tipo di abitazione dalla forma allungata e realizzata in legno e materiali naturali, divisa in due ambienti, che prevedeva la convivenza di uomini e animali. Diffusa dal neolitico al Medioevo in tutta Europa. <http://www.english-heritage.org.uk/daysout/properties/wharram-percy-deserted-medieval-village/history-and-research/long-houses/>

studio e il centro di vari progetti di ricerca che si concentrano sullo sviluppo di un metodo archeologico. Qui prospezioni geofisiche vengono portate avanti dal *Ludwig Boltzmann Institute*⁷⁴ di Vienna e le tecnologie digitali sono state usate anche per la comunicazione pubblica dello scavo⁷⁵. Nel 2010 è iniziato un progetto di documentazione archeologica con l'utilizzo del 3D: mentre veniva scavata una delle tombe, si pensò di provare un metodo innovativo, utilizzando la *Computer Vision* al fine di sviluppare il potenziale derivante dall'uso di tecnologie 3D nel corso dello scavo⁷⁶. Alla fine di ogni giornata di lavoro venivano scattate foto lungo l'area di interesse in modo da coprire l'intera superficie. Queste immagini venivano trasformate in modelli 3D usando la *Structure From Motion* (SFM). Il risultato fu una raccolta di contesti tridimensionali georiferiti dello scavo in corso (Fig. 27).

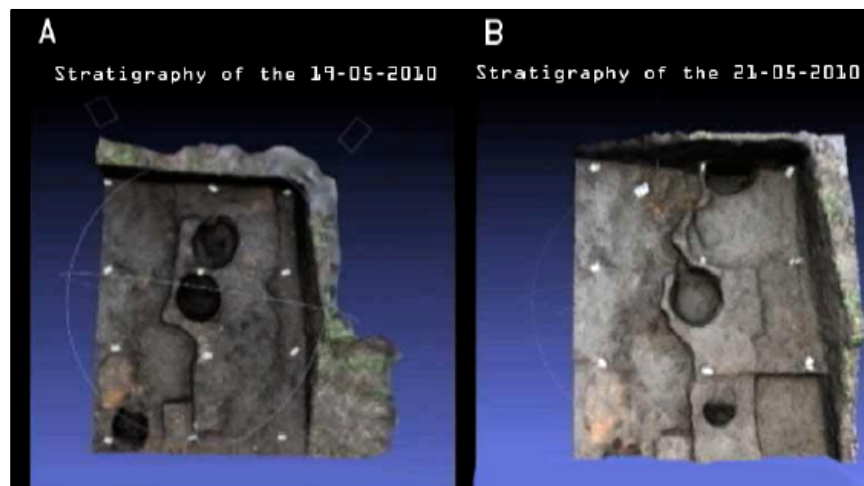


Fig. 27. Due strati differenti della stessa area di scavo documentati in giorni diversi in 3D con l'ausilio della *Computer Vision*

Dopo un breve periodo di formazione sulla tecnica e sul software, gli archeologi furono in grado di effettuare autonomamente il *post processing* dei dati. Il modello, una volta ottenuto, veniva importato in MeshLab per essere scalato e georiferito basandosi su una griglia realizzata

74 <http://archpro.lbg.ac.at/birka-and-uppakra-%E2%80%93-iron-and-viking-age-rural-and-early-urban-landscapes>

75 <http://www.uppakra.se/>

76 Callieri *et al.* 2011

precedentemente usando la stazione totale. L'esperimento ha confermato le potenzialità intrinseche nell'uso di queste tecnologie durante il lavoro sul campo, inoltre la documentazione e la visualizzazione 3D è stata utile per l'interpretazione dello scavo in corso, aumentando la possibilità di "leggere" il sito anche dopo la distruzione della stratigrafia (Fig. 28). L'acquisizione e il trattamento dei dati si sono rivelati economici in termini di tempi e costi, soprattutto perché svolti direttamente sul campo. Il metodo è stato facile da integrare con i metodi già in uso aprendo nuove possibilità nello studio del sito⁷⁷.

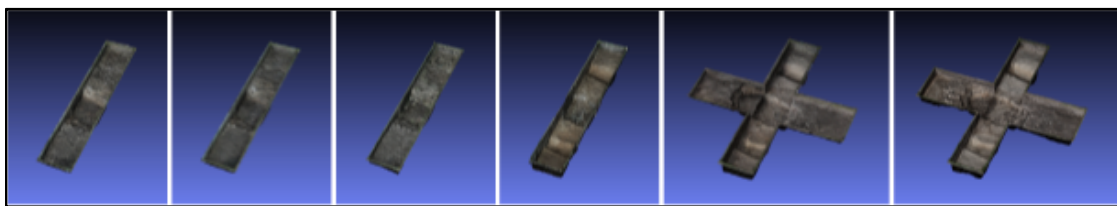


Fig. 28. Modelli 3D degli strati acquisiti in fasi differenti dello scavo

2.2.2. Esempi di documentazione integrata: Çatalhöyük

*“The Neolithic site of Çatalhöyük in Turkey can be considered, for many reasons, an ideal case study for facing complex research methodological questions. More than thirty years of studies, archaeological fieldwork and research have been devoted to investigating the ideology, religion, social status, architectural structures, art, environment and landscape of the site.”*⁷⁸

Il progetto “3D-Digging at Çatalhöyük” è iniziato nel 2010 grazie alla collaborazione tra *Stanford University (Archaeological Center)* e *The University of California Merced* con l'intento di registrare, documentare con tecnologie differenti e visualizzare in Realtà Virtuale tutte le fasi di uno scavo archeologico. La prima fase del progetto (2010) fu orientata prevalentemente a testare differenti tecnologie nel corso dello scavo,

⁷⁷ Callieri *et al.* 2011

⁷⁸ Forte *et al.* 2012

come ad esempio *laser scanner time of flight*⁷⁹ e ottici. Nel corso della seconda fase (2011) il team di *UC Merced* iniziò a scavare una casa Neolitica documentando ogni strato con *phase-shift scanners*⁸⁰ e tecniche di *Computer Vision*. Tale metodo offrì la possibilità di generare modelli 3D degli strati e micro-stratigrafie in *stereovision*⁸¹ nel corso dello scavo, in modo da stimolare una nuova “ermeneutica digitale”⁸². Alla fine della campagna tutti i modelli 3D erano accessibili attraverso un *Teleimmersive system* creato da UC Merced e UC Berkeley (Fig. 29).



Fig. 29. Il sistema di visualizzazione degli strati georiferiti ideato da UC Merced e UC Berkeley a Çatalhöyük

79 Il laser a tempo di volo è un dispositivo di scansione attivo che usa la luce laser per misurare le distanze e rilevare morfologie tridimensionali di superfici riflettenti al laser. Alla base di questo tipo di dispositivo si trova un sensore a “tempo di volo”. Questo calcola la distanza tra lo strumento e una superficie cronometrando con grandissima precisione il tempo di andata e ritorno di un impulso di luce (appunto il tempo di volo). Poiché la velocità della luce è una costante nota, il tempo di andata e ritorno determina la lunghezza della corsa della luce.

80 “The Laser Scanner uses Phase Shift technology to measure the distance to a surface and the Laser tracker uses it to measure the distance to a reflecting mirror called a retro-reflector. In both cases, an infrared laser is sent out and reflected back to the system. The distance is measured by analyzing the shift in the wavelength of the return beam.” <http://www2.faro.com/site/resources/details/1772>

81 3D da immagini

82 Forte *et al.* 2012

Il fine del progetto “*3D-Digging at Çatalhöyük*” è quello di riprodurre l'intero processo dello scavo archeologico usando tecnologie 3D (*laser scanner, Computer Vision, fotogrammetria, image modeling*) sul campo e Realtà Virtuale 3D per la visualizzazione dei depositi di Çatalhöyük in laboratorio, mediante la “teleimmersione”, man mano che vengono scavati. In questo modo è possibile fare in modo che lo scavo diventi un processo virtualmente reversibile, riproducendo in versione digitale tutte le fasi dello scavo strato dopo strato, unità dopo unità così da ottenere: reversibilità del processo di scavo (Fig. 30); trasparenza nella creazione dei modelli 3D; accessibilità e elaborazione dei dati durante il processo di interpretazione; comunicazione finale.

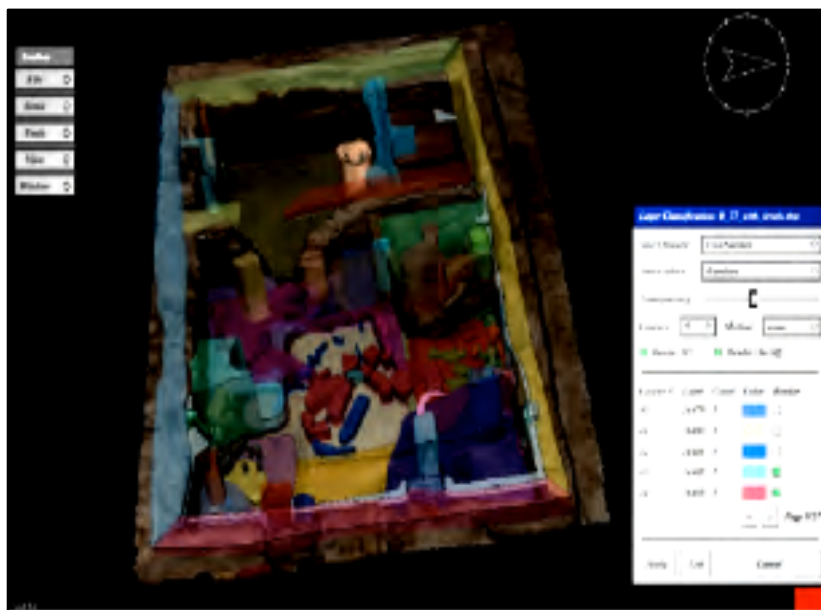


Fig. 30. Visualizzazione 3D dei diversi strati scavati in uno degli ambienti a Çatalhöyük

Il fine ultimo è creare uno spazio collaborativo virtuale nel quale è possibile fare dello scavo un processo completamente aperto e condiviso in tutte le fasi.

2.3. L'uso del laser Scanner nella documentazione delle strutture

Negli ultimi anni, 3D *scanning* e altre tecniche di acquisizione sono state utilizzate in maniera estensiva in archeologia. Tuttavia il 3D *scanning* non

è ancora perfettamente integrato nei contesti di scavo archeologico, sia per il costo della strumentazione (che costituisce il motivo principale della scarsa diffusione di questo potente strumento) sia per il bisogno della presenza di personale che sappia utilizzarlo, sia per la difficoltà di gestire la grande mole di dati prodotta dalle acquisizioni. Questo ha fatto sì che il ruolo del *laser scanning* nella documentazione archeologica venisse relegato a quello di un dispositivo per la documentazione pre/post scavo. Questo dispositivo viene infatti spesso sottovalutato, sia per l'uso che se ne fa in architettura, di pura riproduzione di facciate o semplicemente come base per poi produrre una documentazione bidimensionale. In realtà il *laser scanning* detiene un potenziale significativo per rivoluzionare la documentazione in ambito archeologico. Partendo dal presupposto ben noto che l'archeologia è un processo distruttivo che si può considerare un esperimento irripetibile, l'utilizzo di un *laser scanner* sul campo può aiutare a rilevare strutture, unità e manufatti *in situ*; georeferenziandoli e allineandoli gli uni agli altri è possibile ricreare un modello tridimensionale del processo di scavo⁸³. Anche per il *laser scanning* dunque si parlerebbe di utilizzo in tempo reale e non in "remoto". L'analisi dei dati costituirebbe quindi un'operazione di scavo al contrario, una possibilità preziosissima di riprodurre la sequenza stratigrafica e di ricrearla. Ma prima di utilizzare questo potente strumento su uno scavo va valutato il sito, poi occorre comprendere le finalità del progetto, scegliere quale dispositivo sia più adatto e predisporlo per il tipo di acquisizione che si vuole effettuare. Una volta effettuata l'acquisizione si passa a processare i dati, pulendo le nuvole di punti, allineandole, trasformandole in *mesh* e proiettando *texture* fino ad arrivare alla visualizzazione dei dati. Ma come funziona un laser scanner e come scegliere il modello più indicato per uno scavo come Cencelle? Nelle aree di scavo che ci si era proposti di rilevare, le murature superstiti andavano da un'altezza di circa 60 cm a più di 3 metri. Il laser scanner FARO

83 Forte *et al.* 2012

Focus3D messo a disposizione dall'Università di Lund è sembrato lo strumento più appropriato per acquisire gli ambienti dall'interno e i resti delle murature prospicienti gli assi stradali. Il FARO Focus3D⁸⁴ al momento è il più piccolo e maneggevole (pesa 5 kg) *laser scanner* basato su *Phase Shift Technology*, uno strumento rivoluzionario nel suo campo per le dimensioni ridotte e per la presenza di un *touchscreen* che permette di evitare l'utilizzo contestuale di un laptop, necessario invece per la gran parte dei laser scanner in commercio (Fig. 31).



Fig. 31. Il laser Scanner FARO Focus 3D, piccolo e leggero illustrato agli studenti a Cencelle

È chiaro che su uno scavo come Cencelle -raggiungibile con una scarpinata in salita lungo un sentiero con pendenza notevole- risparmiare sul peso della strumentazione è un guadagno in termini di tempo e di forza lavoro. Il FARO Focus3D inoltre è l'ideale per acquisire spazi estesi con una gamma di applicazioni pressoché illimitata⁸⁵. La *Phase Shift Technology* utilizzata da questo strumento usa un metodo sofisticato di acquisizione dei dati: il raggio laser è proiettato su una superficie e riflesso torna indietro verso lo scanner che usa un software avanzatissimo per tradurre l' "eco" del laser in immagini 3D e misure. Gli oggetti acquisiti vengono rappresentati come nuvole di punti 3D che permettono di creare

84 <http://www.faro.com/en-us/products/3d-surveying/faro-focus3d/overview>

85 <http://www.faro.com/en-us/products/3d-surveying/faro-focus3d/applications-us#main>

una copia virtuale estremamente precisa del reale con un'accuratezza al millimetro, a una velocità di acquisizione fino a 976.000 punti per secondo. In realtà la quantità di punti necessari per la scansione del sito è di gran lunga inferiore se si vuole evitare di processare *file* massivi (dell'ordine dei GB) con conseguente aumento dei tempi di *post-processing*. Il software dello strumento è compatibile con le più comuni applicazioni CAD, rendendo possibile l'esportazione dei dati in formati compatibili con i principali software di modellazione 3D⁸⁶.

La breve campagna di acquisizione a Cencelle, svolta con l'aiuto del Dr. Nicolò Dell'Unto e di Stefan Lindgren, in collaborazione col Dr. Lorenzo De Lellis e il Dr. Sergio Del Ferro, è stata più che altro un sopralluogo approfondito condotto con il fine di cercare un metodo di lavoro facilmente integrabile col sistema di documentazione attualmente in uso sullo scavo. Si è deciso quindi di utilizzare il Laser solo per le strutture che non erano investigate in quel momento, considerati anche i tempi molto stretti a disposizione sia per l'acquisizione sia per il *post-processing*⁸⁷.

Una volta compiuta la valutazione delle aree da acquisire e elaborata la strategia per ottenere il maggior numero di punti con il minor numero di scansioni e dopo alcuni problemi legati a una vegetazione molto fitta in alcuni punti, si è iniziata l'acquisizione. Lo scanner FARO Focus3D acquisisce a 360°; va considerato che lo strumento lavora secondo un campo visivo e parimenti tenuto conto del flusso del *post-processing* (effettuato con MeshLab), che in una prima fase consiste nell'allineamento delle varie nuvole di punti. Per ogni scansione va individuato un punto strategico che contenga preferibilmente una struttura angolare non piatta, che permetta al software di riconoscere le caratteristiche di tale riferimento e pertanto allineare automaticamente (dopo un allineamento manuale) due differenti nuvole di punti. Per evitare

86 <http://measurement-guide.faro.com/glossary-of-measurement-technology/faro-laser-scanner-focus3d.php>

87 http://nico-digitalarchaeology.blogspot.it/2012_10_01_archive.html

occlusioni, conviene acquisire scansioni da lati differenti, ricordando però di mantenere dei punti che si sovrappongano tra diverse scansioni in modo che elementi comuni possano essere riconosciuti e allineati. A Cencelle si trattava di acquisire due quartieri distanti circa 200 metri, connessi dalla strada che costeggia le mura che risaliva un discreto dislivello. Non c'è stato bisogno di alcun *marker*, ma sono stati usati come riferimento dei grossi sassi allineati in punti strategici lungo il sentiero (che altrimenti sarebbe stato caratterizzato solo dalla vegetazione, che disturba lo scanner) da utilizzare in seguito come *marker* per allineare i due gruppi di scansioni e quindi i due quartieri che si trovano a quote differenti (Fig. 32).

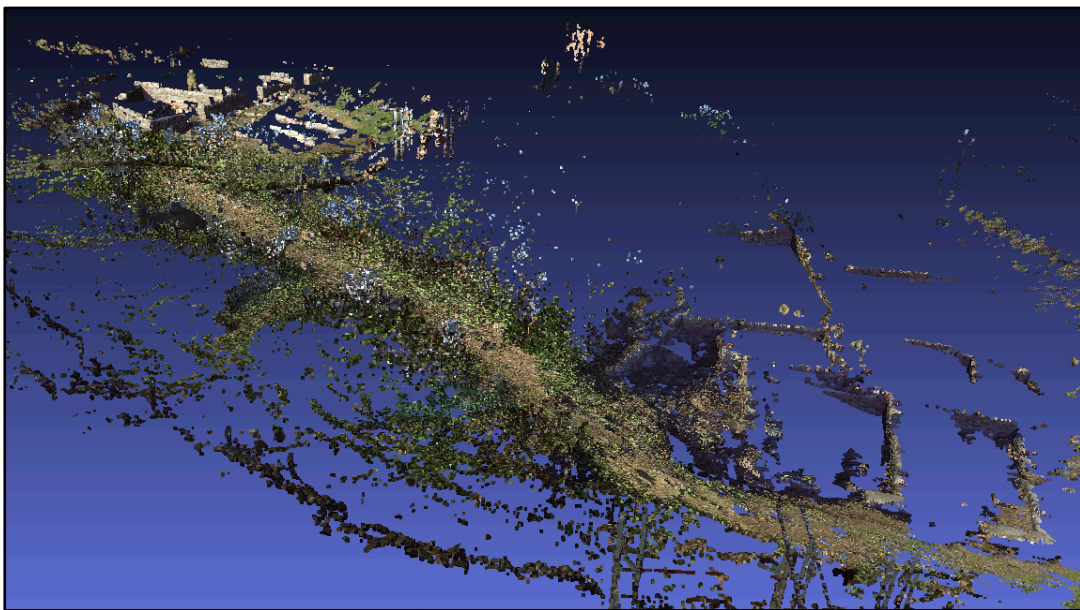


Fig. 32. Il settore I e il settore III allineati usando sassi come *marker*, posizionati in punti strategici lungo la strada in discesa

Ogni scansione alla qualità stabilita è durata 5 minuti, compreso il tempo necessario alla fotocamera integrata nello scanner per acquisire le immagini. L'acquisizione con laser scanner ha interessato i quartieri residenziali dei Settori I e III di Cencelle, nei quali in tre giornate di lavoro e con non poche difficoltà legate alla fitta vegetazione, sono state effettuate 78 scansioni con un "peso" medio di circa 80 MB per *scan*.

Il ricevitore GPS differenziale RTK Altus è stato usato per produrre una veloce descrizione della topografia del sito, oltre che per calcolare la posizione dei punti di controllo utilizzati per georiferire i modelli 3D prodotti dalle diverse tecnologie nel corso della campagna⁸⁸ (Fig. 33).

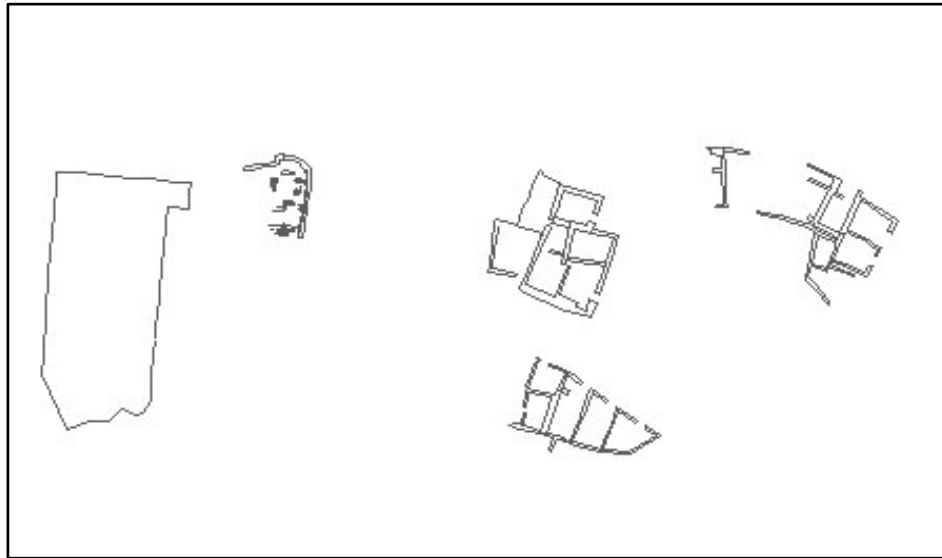


Fig. 33. Il profilo degli edifici acquisiti georiferiti in due giorni con il GPS differenziale RTK Altus

2.3.1. Il *post-processing* - MeshLab

MeshLab è un sistema *open source* portabile e estensibile per il *processing* e *l'editing* di *mesh* poligonali non strutturate. Il sistema è stato creato per trattare modelli di grandi dimensioni, tipici del 3D *scanning*, grazie a un insieme di strumenti per l'elaborazione, la pulizia delle *mesh*, il *rendering* e la conversione. Il sistema si basa sulla VCG *library* sviluppata presso il *Visual Computing Lab* del CNR-ISTI di Pisa⁸⁹. L'interfaccia di MeshLab permette di organizzare la geometria in livelli (come i programmi di grafica 2D) permettendo di “accendere” o “spegnere” determinate parti del modello. MeshLab permette di proiettare

88 http://nico-digitalarchaeology.blogspot.it/2012_10_01_archive.html

89 <http://MeshLab.sourceforge.net/>

il colore⁹⁰ sul modello da immagini in modo da rendere i modelli più dettagliati, anche quando il livello di dettaglio della geometria è stato decimato. L'utilizzo di MeshLab offre inoltre la possibilità di analizzare e presentare i dati.

Nel *post-processing* con MeshLab dei dati acquisiti con il *laser scanner* si è stabilita una *pipeline* che ha portato a ottenere modelli 3D “puliti” e accurati.

Le nuvole di punti risultato delle scansioni sono state esportate in formato .PTX, importate in MeshLab come *point cloud* e convertite in .PLY. Dopodiché si è provveduto a decimare gli *scan* per rendere le nuvole di punti meno dense. Queste, importate nel software, si presentano come una massa esplosa da decifrare e allineare (Fig. 34).

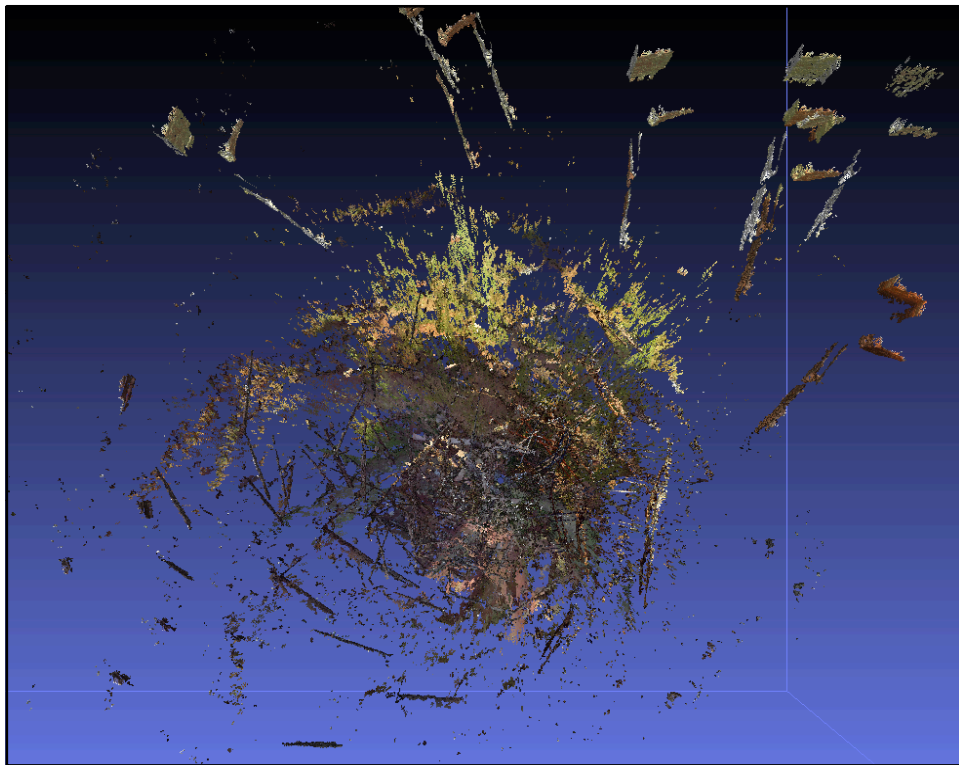


Fig. 34. Le nuvole di punti corrispondenti ai vari *scan* importate in MeshLab

⁹⁰ MeshLab usa un approccio automatico per allineare immagini al modello 3D stimando nuovamente i parametri della camera associata all'immagine per migliorare la qualità della registrazione. Corsini *et al.* 2009

Nello *step* successivo si è provveduto ad allineare le nuvole di punti. Si è iniziato applicando la funzione “*glue*” -incolla- a uno degli *scan* mediani, che quindi avesse il maggior numero di punti in comune con gli altri, rendendolo la *mesh* di partenza. Poi si è usato il “*point based glueing*” che permette di allineare due *scan* scegliendo manualmente 4 o più punti in comune (Fig. 35).

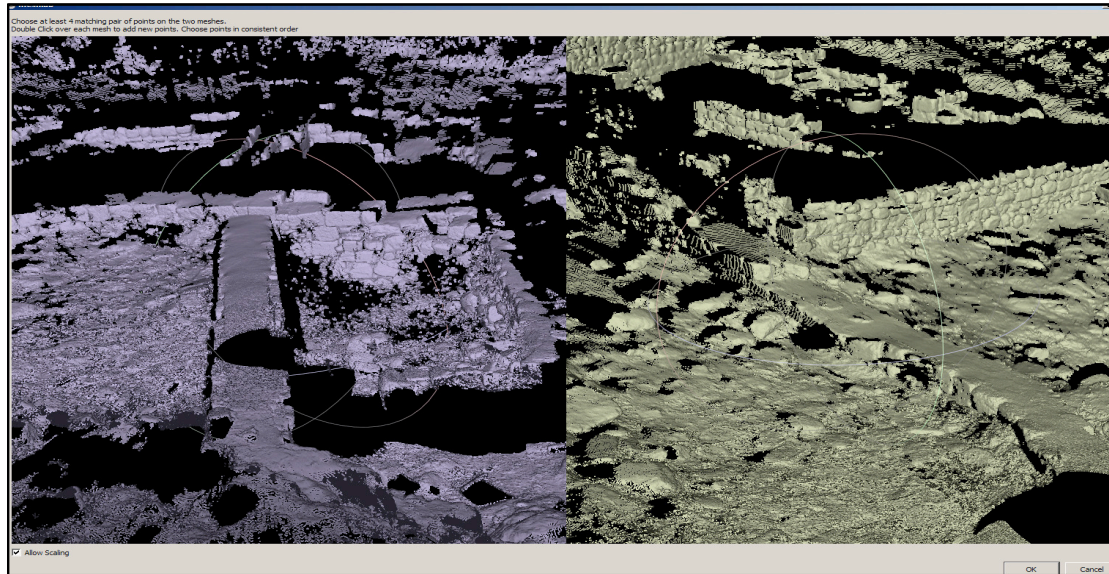


Fig. 35. Il processo di allineamento delle nuvole di punti in MeshLab

Una volta terminato l'allineamento e salvato il progetto vengono registrate automaticamente le coordinate dell'allineamento. Questo permette di sostituire i modelli decimati con quelli più densi che risulteranno anch'essi allineati. La fase finale che permette di ottenere una geometria con facce poligonali è il “*merging*”. Per le acquisizioni in oggetto si è scelto di applicare il *Poisson*⁹¹ caricando il file con le nuvole di punti allineate e eseguendo il comando “*flatten*” -appiattire- dando il via alla ricostruzione. Questo algoritmo ha purtroppo un grave limite, legato alla potenza di calcolo della macchina che usa per processare i dati. Quelli relativi al presente progetto sono stati gestiti grazie a una *workstation* avente le seguenti caratteristiche: CPU Intel Core i7-3930K(3,2GHz); RAM 32GB DDR3 1600Mhz-9; GPU Nvidia GTX680 2GB. Una volta ottenuta la

⁹¹ *Poisson Surface Reconstruction* è un algoritmo che applica la distribuzione statistica di *Poisson* alla ricostruzione della *mesh*

geometria si è provveduto a filtrarla dal rumore e dagli elementi che non risultavano utili (come ad esempio gli archeologi che continuavano a lavorare “catturati” dal *laser scanner* loro malgrado) e a chiudere la maggior parte dei piccoli buchi.

Utilizzare tecnologia *laser scanner* allo stato dell’arte a Cencelle e curarne il *post processing* ha portato a una riflessione sull’organizzazione del lungo lavoro di integrazione di tecnologie 3D con lo scavo tradizionale. Osservando la Figura 33 si comprende che per i non avvezzi all’uso di questo tipo di strumentazione, l’elaborazione dei dati non è immediata, tanto più se ci si trova ad operare su dati non acquisiti personalmente o peggio, su dati relativi a luoghi non noti. Se si vuole arrivare a una perfetta integrazione delle tecnologie evitando che dati preziosi vengano accantonati per anni e resi inutilizzabili perché incomprensibili, uno dei primi obiettivi da perseguire è la formazione di gruppi in grado di acquisire e processare correttamente i dati sia sul campo sia in seguito e che conoscano lo scavo, così da poter riconoscere le aree acquisite anche da una nuvola di punti non allineata. Un fattore, quest’ultimo, che permette senz’altro di guadagnare tempo rendendo più produttivo il lavoro sul campo e in laboratorio.

2.4. L’uso dell’*Image Based Modelling* come strumento rapido e *low cost* per la documentazione e l’acquisizione in tempo reale

Nel momento in cui si decide di utilizzare un approccio che coniughi e integri differenti strumenti digitali, dove non arriva il laser scanner, per motivi legati alle dimensioni, alla posizione, a spazi angusti, a fenomeni meteorologici, allora interviene la *Computer Vision*⁹². Coniugare le due tecniche aiuta anche a comprendere meglio come le tecnologie 3D possano essere usate nel corso dello scavo come mezzo efficiente per trattare il dato archeologico. Negli ultimi anni, l’efficienza di *Structure From Motion* (SFM) e *Dense Stereo Matching* ha portato alla creazione di

⁹² *Computer Vision*: una scienza in grado di sviluppare tecniche matematiche per recuperare la forma e l’aspetto tridimensionali degli oggetti nelle immagini. (Szeliski 2010)

metodi molto affidabili per la creazione di modelli 3D da insiemi di immagini non calibrate ⁹³. Per ogni coppia di immagini viene rintracciato automaticamente un certo numero di punti in comune e questo fa sì che i parametri della fotocamera vengano associati a ognuna delle foto. Il risultato finale è una *depth map* per ogni immagine tramite l'associazione di coordinate 3D a ogni pixel. Sebbene non si tratti di un processo metrico come il *laser scanning*, la geometria prodotta può essere perfettamente scalabile e utilizzabile per l'interpretazione di un sito. Si tratta dunque di *image processing* combinato con tecniche di *Stereo Matching*. Di recente la SFM ha ricevuto grande attenzione dal momento che permette di ricostruire geometrie tridimensionali e gli spostamenti della camera a partire da una sequenza di immagini bidimensionali catturate da quest'ultima in movimento sulla scena. Per ottenere questo risultato l'algoritmo di SFM riconosce alcuni punti caratteristici dell'immagine (particolarità della geometria, spigoli o altri dettagli) e riesce di conseguenza a monitorare il movimento di quei punti attraverso la sequenza di immagini. Usando queste informazioni come input, il software stima la posizione di tali punti e la restituisce in forma di nuvola di punti. La buona riuscita della SFM dipende molto dalla conoscenza accurata delle posizioni della camera, che costituisce il nodo fondamentale della *Computer Vision*.

Per Cencelle si è scelto PhotoScan, prodotto software di Agisoft, una soluzione che permette di visualizzare contenuti tridimensionali di alta qualità a partire da una serie di immagini fotografiche sovrapposte. A differenza di alcuni software di fotogrammetria, come ad esempio PhotoModeler⁹⁴, le immagini possono essere generate da fotocamere non calibrate di ogni tipo: dalla reflex professionale a quella integrata in un telefono cellulare. Rispetto ad altri software di *Computer Vision*

⁹⁴ "The PhotoModeler Software extracts 3D Measurements and Models from photographs taken with an ordinary camera. A very cost-effective way of doing accurate 3D scanning, measurement and surveying." <http://www.PhotoModeler.com/index.html>

PhotoScan riesce a gestire sia immagini sia sequenze video. Ogni parte visibile in almeno due fotogrammi ha elevata probabilità di essere ricostruita; in ogni caso, per ottenere un modello 3D servono almeno tre immagini⁹⁵. Ma perché far cadere la scelta su PhotoScan? Altri prodotti analoghi, come ad esempio 123D Catch⁹⁶ o Arc3D⁹⁷, sono altrettanto affidabili, ma hanno un limite: sono *web based*. Le immagini vengono processate da un *web service* che le invia a un *server* remoto che a sua volta restituisce il modello completo, richiedendo una connessione internet per produrre 3D da immagini e, come noto a tutti gli archeologi, non è ovvio che uno scavo -in qualsiasi parte del mondo esso si trovi- disponga di una connessione. PhotoScan inoltre ha la caratteristica fondamentale (e utilissima) di generare alla fine del processo di ricostruzione una *texture map* che viene esportata insieme al modello ed è visualizzabile dai vari strumenti di *post processing* che si decide di utilizzare. Oltre al vantaggio dato dal lavorare in locale, tutte queste caratteristiche permettono di risparmiare in termini di tempo usando sullo scavo un unico strumento per documentare strati e manufatti in tempo reale prima che vengano distrutti. Differentemente da *laser scanner* e fotogrammetria, per i quali costi e tempi richiesti per il trattamento dei dati a volte non incoraggiano chi intende usarli per l'indagine sul campo (ad es. scavi universitari con *budget* minimi), la *Computer Vision* permette di documentare con costi molto ridotti gran parte degli elementi dello scavo, dalle decorazioni architettoniche agli oggetti di uso comune alle strutture, con descrizioni 3D complete e dettagliate dello scavo in corso.

2.4.1. Il procedimento

Nel caso di Cencelle la *Computer Vision* è stata utilizzata nei quartieri residenziali per integrare i dati acquisiti con il *laser scanner* e condurre

95 Verhoeven 2011

96 <http://www.123dapp.com/catch>

97 <http://www.arc3d.be/>

dei confronti fra le tipologie di suppellettili, come ad esempio le vaschette in pietra; nell'area cimiteriale in prossimità della chiesa, per documentare giornalmente l'avanzamento dello scavo delle numerose sepolture (Cfr. par. 2.2); nella cripta (Cfr. par. 2.1.2) come pura sperimentazione, con risultati molto soddisfacenti in termini di resa grafica e soprattutto come rapidità.

Si sono utilizzate due fotocamere, una Canon EOS 550D con obiettivo grandangolare e una Canon PowerShot G10 usata in modalità programma. Il processo automatizzato che trasforma un set di immagini in un modello 3D consta di tre fasi: nella prima vengono allineate le fotografie utilizzando la *Structure From Motion*. In questa fase il software estrae e sovrappone i punti in comune a due immagini per volta calcolando la loro posizione nello spazio.

Dopo la prima fase di processing PhotoScan genera tre tipologie di dati:

- una nuvola di punti (migliaia di punti ognuno con coordinate tridimensionali che rappresentano la struttura della scena) (Fig. 36);

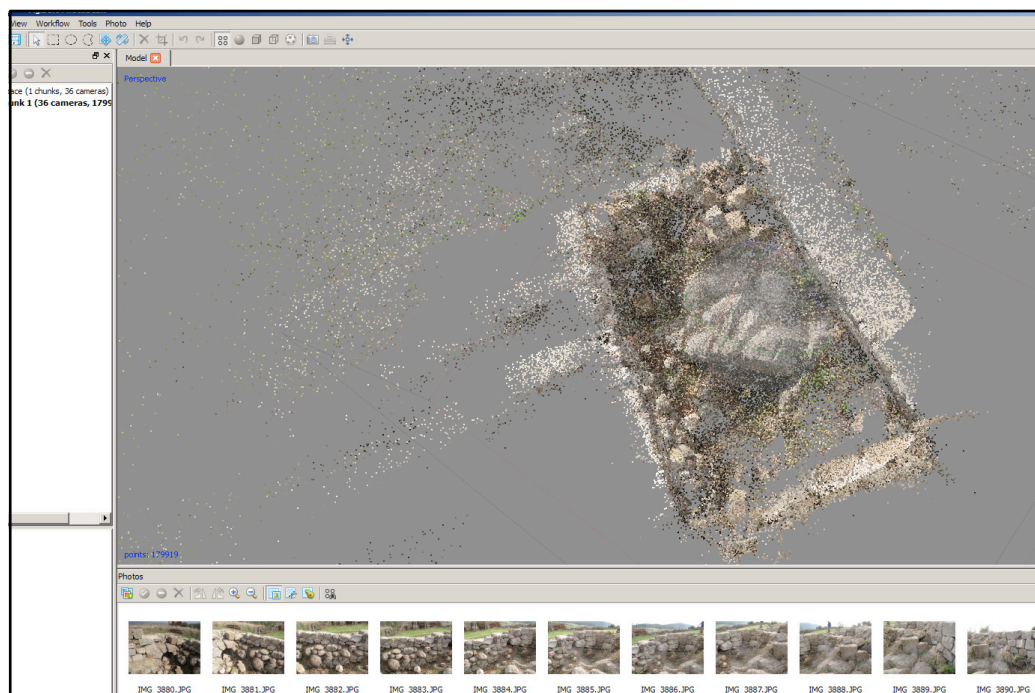


Fig. 36. La nuvola di punti generata da 36 immagini acquisite nell'ambiente B nel Settore III

- la posizione della camera al momento dell'acquisizione delle immagini (Fig. 37);

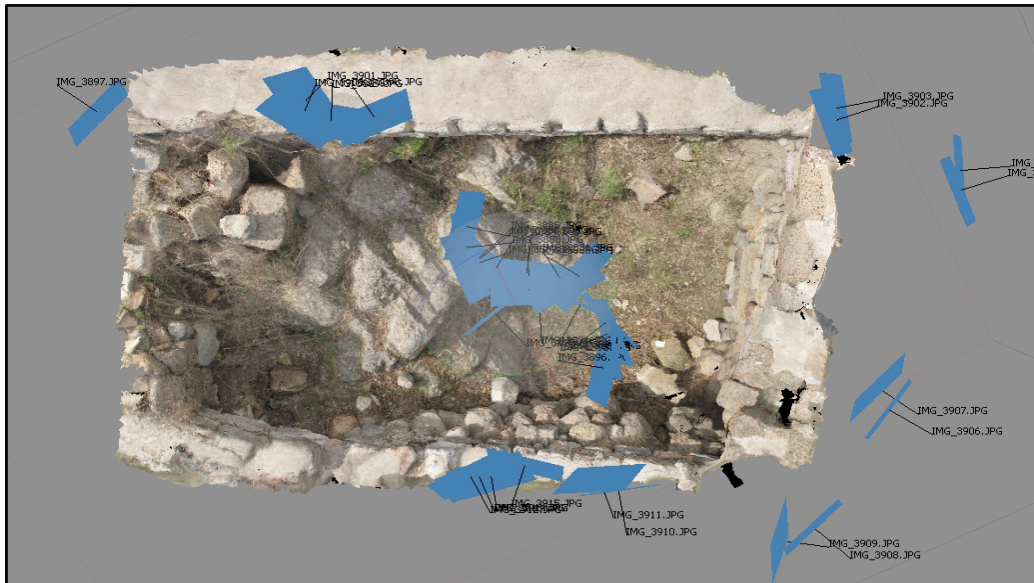


Fig. 37. Le 36 posizioni della camera nel corso dell'acquisizione fotografica dell'ambiente B

- i parametri di calibrazione interna come distanza focale, posizione dei punti e coefficienti di distorsione⁹⁸.

Nella seconda fase viene ricostruita la geometria della scena applicando alle immagini allineate una *multiview stereo-reconstruction*. Mentre l'algoritmo di SFM opera su un set di punti estratti dalle immagini, l'algoritmo di *Dense Stereo Matching*, che genera la geometria, agisce sulle coordinate dei pixel. Una volta che tutti i pixel sono stati utilizzati, è possibile visualizzare tutti i dettagli presenti nella scena in forma di *mesh*. PhotoScan supporta vari algoritmi di *Dense Stereo Matching* permettendo di scegliere fra una ricostruzione "*smooth*" (consigliata per oggetti ed edifici) e l'opzione "*Height field*" (da utilizzare per la ricostruzione del paesaggio da foto aeree, ad esempio); offre infine la possibilità di ricostruire la geometria in modalità *fast*, per una prima rapida visualizzazione con un numero inferiore di poligoni. Un ulteriore parametro è il *face count* (il conteggio delle facce, che permette di scegliere quale sia il livello di dettaglio desiderato). Per alcuni dei modelli

⁹⁸ Verhoeven 2011

di Cencelle, quelli per i quali non c'era bisogno di una geometria molto densa, si è scelto di mantenere i valori di default di 200000 facce. Per altri si è impostato "0" che non indica un limite per il numero di facce e produce il massimo dettaglio. Questo parametro, insieme ad alcuni *filter thresholds* che assegnano una misura massima ai "buchi" che vanno chiusi con poligoni là dove mancano informazioni, e la possibilità di scegliere che tipo di qualità dare alla *mesh* (fattore che incide sul tempo di *processing* e sul "peso" del prodotto finale) permettono di stabilire quale sarà la qualità del modello. Va da sé che la scelta dell'opzione "*high quality*" produce una geometria più dettagliata e un *file* di maggiori dimensioni rispetto alla scelta di "*low*" e "*medium quality*" (Fig. 38).

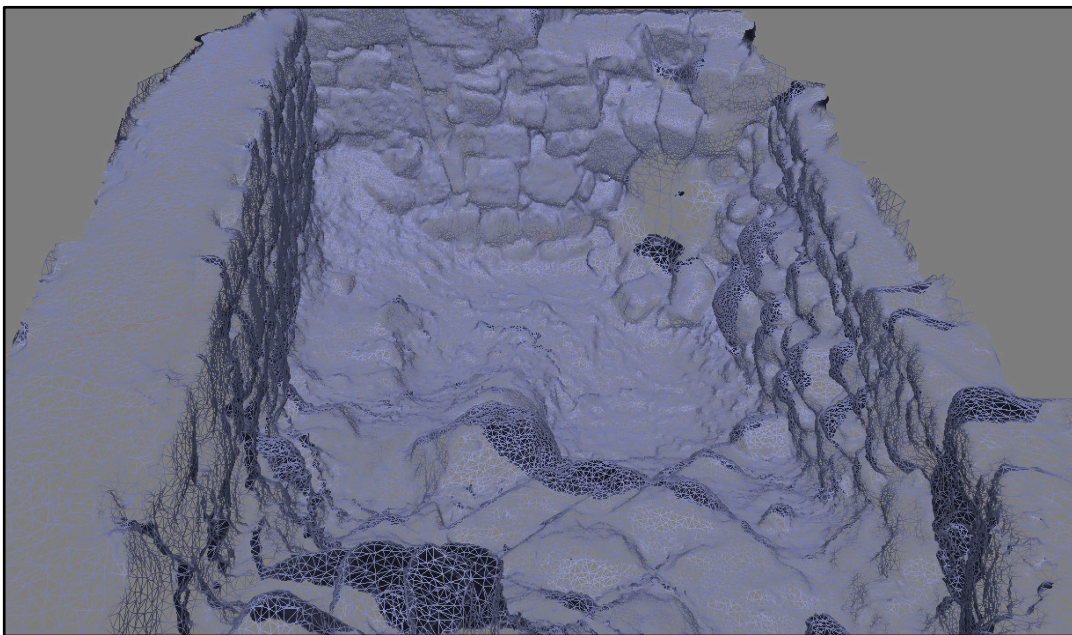


Fig. 38. La geometria molto densa ottenuta da 36 immagini per l'ambiente B del Settore III

Da ultimo, la *mesh* può essere dotata di *texture* usando le stesse foto utilizzate per costruire la geometria con la possibilità di scegliere il tipo di mappatura ("*Generic Orthophoto*" se si tratta di "texturizzare" il modello di un paesaggio, "*generic mapping mode*" per superfici verticali) (Fig. 39).



Fig. 39. L'ambiente B del Settore III "texturizzato" in PhotoScan

Naturalmente la buona riuscita del modello finale dipende molto dalla qualità delle immagini ottenute nel corso della campagna di acquisizione e dalla potenza della macchina usata per processarle; un limite è costituito da oggetti completamente piatti o bianchi o oggetti riflettenti, che non vengono riconosciuti dal software, quindi anche dalla presenza di superfici con acqua ⁹⁹ (nonostante esperimenti condotti a riguardo inizino a dimostrare il contrario (Cfr. par. 2.5). La campagna fotografica è perciò la parte più delicata dell'intero processo. Come sperimentato a Cencelle, diversamente da ambienti chiusi, nei quali è possibile organizzare set fotografici con condizioni di luce controllate, lo scavo presenta una situazione differente e mutevole. Sperimentando la tecnica sia in Svezia sia in Italia, è facile notare come in Nord Europa, grazie ai fenomeni di nuvolosità più frequenti, si trovano le condizioni migliori per l'acquisizione fotografica. L'esperienza di Cencelle ha mostrato come in Italia il sole inesorabile (pur riprendendo immagini ad Ottobre inoltrato) e le ombre marcate abbiano reso arduo fotografare in condizioni di luce ideali. Là dove è difficile influenzare le condizioni ambientali, bisogna trovare il

⁹⁹ Documentare le vaschette nei quartieri residenziali a Cencelle ha comportato il loro svuotamento a mano e con mezzi di fortuna, prima di procedere all'acquisizione fotografica

giusto equilibrio tra i parametri della camera e il percorso da effettuare con la fotocamera stessa (Fig. 40). Una buona combinazione di queste caratteristiche è la premessa per realizzare un'eccellente campagna fotografica¹⁰⁰. Progettare in anticipo, magari sulla carta, le posizioni per l'acquisizione fotografica è un'utile strategia.

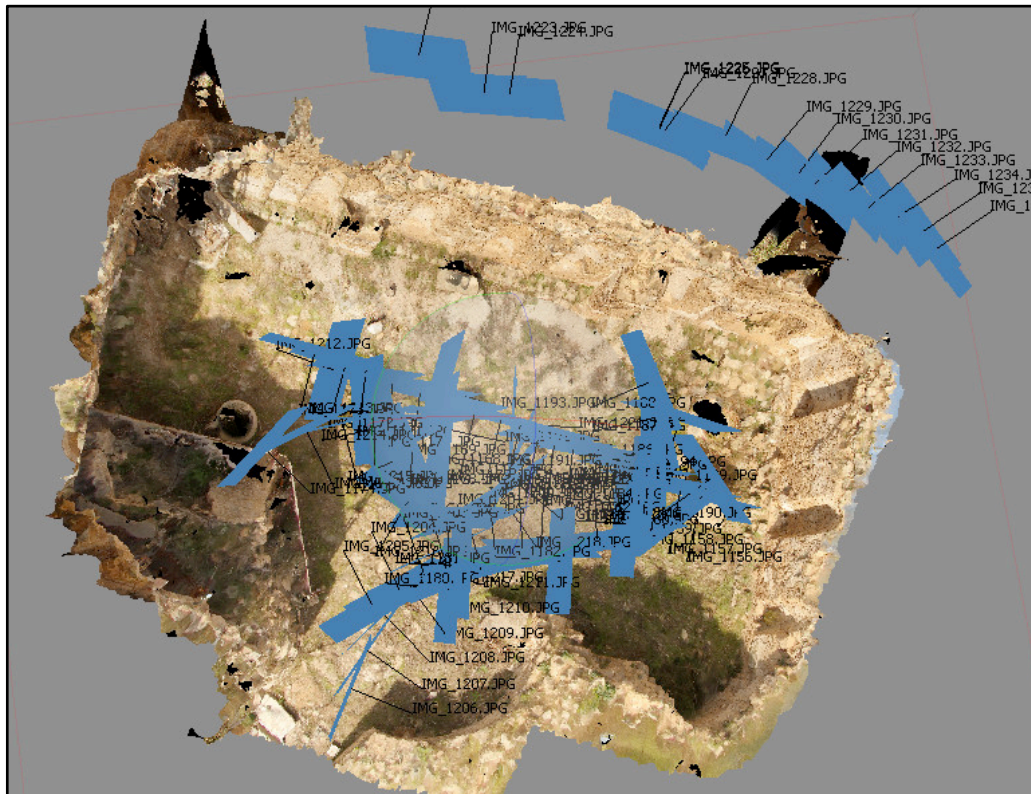


Fig. 40. Le posizioni della camera al momento dell'acquisizione delle immagini mostrano anche quale tipo di percorso strategico si sia seguito per massimizzare i risultati in 3D

In ogni caso PhotoScan riesce a generare *mesh* tridimensionali da file JPEG, TIFF, PNG, BMP o MPO e in ogni fase del processo di costruzione della geometria è possibile intervenire abilitando o disabilitando immagini, creando maschere o importando *textures* e *mesh* create in altre applicazioni¹⁰¹. Per ottenere un buon modello è sufficiente che la scena sia visibile in almeno due immagini. Un altro grande punto di forza del software è, in base all'esperienza di chi scrive, la possibilità di trattare immagini acquisite in precedenza senza che ci fosse la volontà di “darle

100 Dell'Unto *et al.* 2010

101 <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/>

in pasto” a software di *Computer Vision*. Lo prova un esperimento effettuato presso lo scavo del castello di Monreale a Sardara (CA)¹⁰² dove numerose immagini erano state precedentemente acquisite dal pallone con condizioni di luce pessime, con l'intento di documentare in 2D il mastio in cima a una collina. Dopo numerosi esperimenti, riducendo il numero di immagini (da circa 200 a 47) per evitare ridondanze, si è ottenuto un modello affidabile, scalato poi in MeshLab, dell'intero castello (Fig. 41).



Fig. 41. Il modello del mastio di Monreale-Sardara (CA) in 3D ottenuto da foto aeree scattate per documentazione bidimensionale

L'esempio dimostra l'efficacia di PhotoScan, che eccelle soprattutto nel trattamento di foto aeree. Quest'ultimo caso-studio si può anche proporre come esempio eclatante di "riciclo" di dati a costo zero, aprendo la strada a una nuova tematica, che potrebbe portare alla generazione di documentazione in 3D a distanza di tempo. Scavi ormai chiusi o coperti da colate di cemento possono essere documentati a partire dalla

¹⁰² Lo scavo condotto dall'Università di Cagliari e dalla cattedra di Archeologia Medievale della Sapienza è tuttora in corso e i risultati non ancora pubblici.

documentazione fotografica di campagne passate, purché di qualità sufficiente.

2.5. Laser scanning e Computer Vision: alcuni casi-studio

Di seguito vengono proposti alcuni casi-studio costituiti da progetti internazionali recenti o in corso, che sono riusciti nell'intento di coniugare tecniche di *laser scanning* e di *Computer Vision*, o che hanno effettuato un utilizzo estremo di questi potenti mezzi, con risultati eclatanti.

2.5.1. Pompeii - a 3D revival

“Through this project we will be able to study Pompeian architecture by means of different types of 3D-models and virtual reality tools. The goal of this research is to visualize the ancient structures in order to help researchers and other visitors in understanding how these environments were used in the past” ¹⁰³.

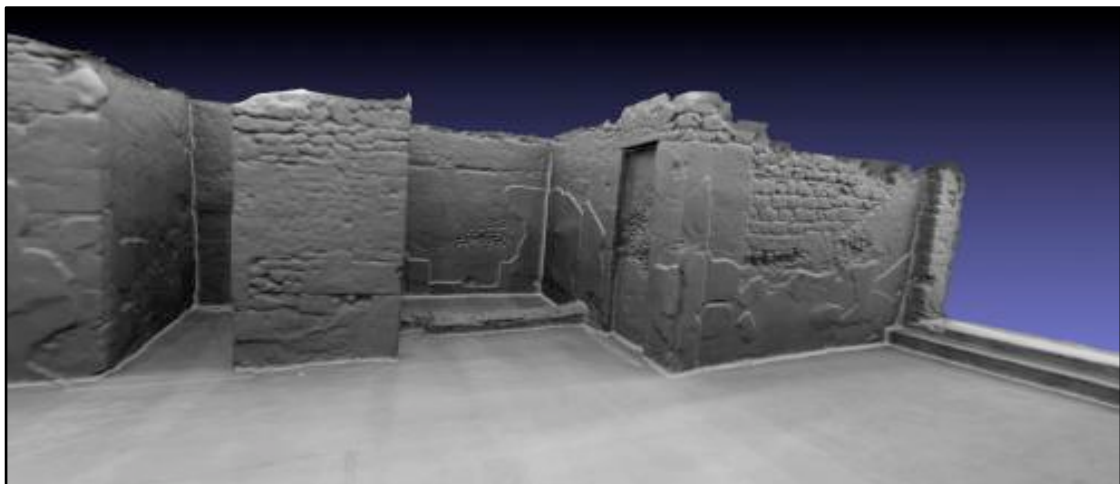


Fig. 42. La Casa del Torello di Bronzo, risultato delle acquisizioni con *laser scanner*

Il progetto (al quale chi scrive ha avuto il privilegio di partecipare nella fase di elaborazione dei dati) condotto dai ricercatori dell'*Institutionen för arkeologi och antikens historia* dell'Università di Lund in collaborazione con lo *Humanities Lab* della stessa università e il CNR-ISTI di Pisa, punta a investigare, documentare e visualizzare l'architettura pompeiana per mezzo di differenti tipologie di modelli 3D (entrambi in modalità “com’era-

¹⁰³ <http://www.lunduniversity.lu.se/o.o.i.s?id=24732&postid=3346585>

com'è"). L'uso di tecniche di acquisizione come *3D scanning* o *Dense Stereo Reconstruction* migliora la conoscenza delle relazioni tra le infrastrutture tecnologiche (condotti idrici, illuminazione, riscaldamento ecc.) dell'*insula* oggetto di studio e la distribuzione di spazi di lavoro, commerciali e di aggregazione all'interno del contesto prevalentemente domestico. L'uso di un solo strumento o di una tecnica unica non sarebbe stato sufficiente per raggiungere l'obiettivo, "*From my experience out in the field, I learned that does not exist any technique, technology or documentation platform able to cover entirely the documentation of an archaeological site*¹⁰⁴." L'integrazione di più tecnologie è dunque l'unico modo per affrontare la documentazione di siti archeologici. La flessibilità nel metodo permette agli archeologi di sviluppare una ricerca creativa e dinamica usando più strumenti. Per la comunicazione, attraverso tecniche di Realtà Virtuale, i visitatori saranno guidati a scoprire i complessi pompeiani di Casa del Torello di Bronzo e Casa di Cecilio Giocondo, per comprendere le relazioni tra l'attuale contesto archeologico e l'aspetto originario. La connessione -nello stesso ambiente virtuale- di passato e presente guiderà l'utente attraverso un'esperienza di *time travel* (Fig. 43).



Fig. 43. La visualizzazione in tempo reale della Casa di Cecilio Giocondo all'interno dell'iCube presso IKDC-Lund

L'applicazione sarà progettata come un'infrastruttura virtuale che condurrà l'utente dal passato al presente accrescendo -con l'uso di un

104 http://nico-digitalarchaeology.blogspot.it/2012_09_01_archive.html

linguaggio visivo 3D- la conoscenza del passato. I risultati di questo lavoro saranno visualizzati su due piattaforme differenti: una disegnata in maniera specifica per mostrare le strutture dell'*insula* in alta risoluzione sul web, l'altra come guida per una mostra sull'*insula* V 1, che si terrà a Stoccolma nel 2014.

2.5.2. The 2012 Petra Cyber-Archaeology Conservation Expedition

“The recent partnership between the University of California, San Diego-California Institute of Telecommunications and Information Technology (UCSD-Calit2), the American Center of Oriental Research (ACOR) and the Department of Antiquities of Jordan in the Petra Archaeological Park represents a case study in how cyber-archaeology can contribute to both conservation and research goals of different stake-holders ¹⁰⁵”.

Dal 1999 l'UCSD-Calit2 collabora ad attività di ricerca in *cyber-archaeology* nel distretto di Faynan in Giordania, circa 25km Nord-Ovest di Petra. Dal momento che Petra e Faynan appartengono entrambi alla regione nota come “Edom” nella Bibbia e in altre fonti dell'antichità, la storia e l'ambiente di queste due aree sono strettamente connessi. L'applicazione di *cyber-archaeology* si è svolta nel corso di una campagna di due giorni condotta in prossimità del Tempio dei Leoni Alati, una struttura che si ritiene completata intorno al 27 d.C. e dedicata alla dea al-Lat/al-'Uzza, moglie del dio Dushara. Per le applicazioni sono state acquisite fotografie ad alta definizione da pallone e sono state eseguite scansioni usando LiDAR (*Light Detection and Ranging laser*), *Structure from Motion* (SfM), sviluppando infine applicazioni di Realtà Aumentata (AR) per il turismo nel parco di Petra. Il Tempio dei Leoni Alati e i suoi ambienti sono stati acquisiti in maniera dettagliata con le foto da pallone applicando strategie diverse in base alla forza del vento e alle condizioni meteo. Le 3572 foto acquisite sono state trattate con AgiSoft PhotoScan per poi andare a integrare i dati del *laser scanner*. Un *laser scanner*

¹⁰⁵ Levy *et al.* 2013

terrestre è stato usato per acquisire l'interno della chiesa bizantina e il Tempio sia all'esterno sia all'interno. All'interno della chiesa lo scanner ha catturato anche dettagli ad alta risoluzione dei mosaici nelle navate (Fig. 44).



Fig. 44 La nuvola di punti derivata dalle acquisizioni con LiDAR che documenta il pavimento in mosaico all'interno della chiesa

Le informazioni geospaziali ottenute dal LiDAR possono essere sovrapposte alle immagini per creare un modello accurato a precisione millimetrica. Il fine ultimo dell'operazione è creare una raccolta dettagliata di strutture potenzialmente esposte a erosione o ad atti vandalici. Ripetere l'operazione annualmente può aiutare a tenere traccia dei cambiamenti e informare sulle tecniche di conservazione per prevenire ulteriori danni; ad esempio nella chiesa bizantina gli *scan* hanno acquisito i mosaici restaurati e ogni loro scansione futura aiuterà a rilevare movimenti che potrebbero richiedere azioni conservative. Un ulteriore obiettivo del lavoro è stato raccogliere dati fotogrammetrici e nuvole di punti da utilizzare con ARtifact, un'applicazione di Realtà Aumentata, che permette all'utente di recuperare informazioni su siti e manufatti usando dispositivi mobili come ad esempio tablet. Puntando la fotocamera del proprio tablet verso il manufatto, questo o le sue caratteristiche vengono identificate automaticamente mentre sullo schermo compaiono

informazioni relative all'oggetto o alla struttura. Tali contenuti vengono forniti a livelli differenti, per studiosi o semplici visitatori. Un ulteriore livello fornisce l'accesso a dati per la documentazione scientifica riservati agli specialisti. La Realtà Aumentata permetterà di aggiungere al risultato delle acquisizioni immagini comparative di mosaici o possibili integrazioni dei mosaici eventualmente perduti. L'applicazione di diverse tecnologie perfettamente integrate, fornisce dunque la possibilità di accedere in tempo reale a metadati¹⁰⁶ su strutture, monumenti, decorazioni fuori dal comune, come i mosaici bizantini di Petra, un caso-studio unico.

2.5.3. Extreme SfM - Underwater Archaeology

ATOR (Arc-Team Open Research) è un blog tenuto dai due archeologi e ricercatori Luca e Alessandro Bezzi. Si tratta di uno strumento utilissimo per la divulgazione di esperimenti, problemi e risultati della ricerca dell'Arc-Team in archeologia, seguendo le linee guida dell'OpArc (Open Archaeology) project. Uno degli ultimi post risponde con un interessante esperimento a due domande:

- 1) È possibile utilizzare tecniche di SfM/IBM¹⁰⁷ sott'acqua?
- 2) È possibile estrarre un modello 3D da un filmato?

“As regards the first question, I can report that since we started to work with SfM and IBM (2009), we did also tests underwater and they gave us positive results. This is one of the main reasons why we invested so much time on the research in this field: SfM and IBM methodology, until now, is one of the best solutions in archeology, due to its versatility (it can be

¹⁰⁶ “Metadata describes other data. It provides information about a certain item's content. For example, an image may include metadata that describes how large the picture is, the color depth, the image resolution, when the image was created, and other data. A text document's metadata may contain information about how long the document is, who the author is, when the document was written, and a short summary of the document”. <http://www.techterms.com/definition/metadata>

¹⁰⁷ Structure from Motion/Image Based Modeling

*used for underwater or aerial documentation, in low light conditions or in precarious situation etc.*¹⁰⁸”

Il risultato di questo esperimento è stato presentato nel corso di ArcheoFOSS 2012 a Napoli nel corso del workshop “Low-cost 3D, sensori, algoritmi e applicazioni” e ha offerto la possibilità di analizzare meglio l’uso di tecnologie di SfM/IBM in condizioni di lavoro estreme.

Come mostra l’immagine (Fig. 45), grazie a queste tecnologie è stato possibile ottenere un modello 3D dello scavo in un ambiente chiuso e angusto documentandolo con un UAV¹⁰⁹ *Open Source* e una videocamera e trattando i dati con il sistema operativo ArcheOS (PPT) ideato e sviluppato dallo stesso Arc-Team.

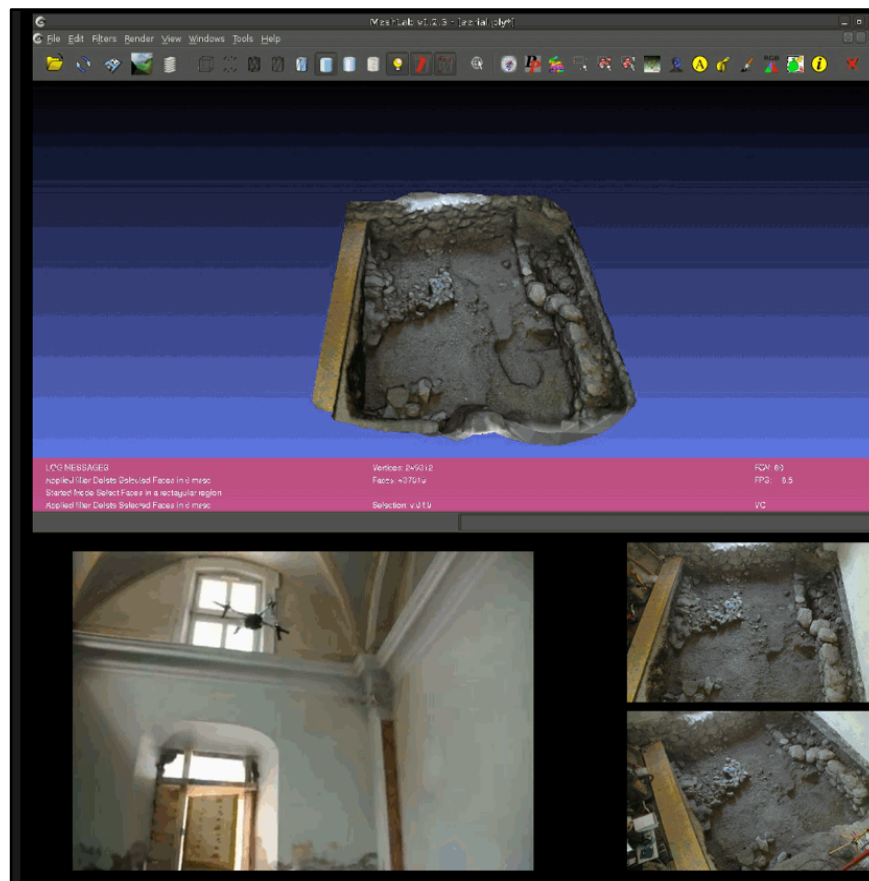


Fig. 45. Documentazione aerea video di un interno angusto con un KKopter

¹⁰⁸ <http://arc-team-open-research.blogspot.it/search?updated-max=2013-03-25T00:17:00%2B01:00&max-results=7>

¹⁰⁹ *Unmanned Aerial Vehicle* (anche detto Drone). Si tratta di un quadricottero (o multicottero) comandato a distanza e dotato di una fotocamera montata sulla struttura.

È dunque possibile ricostruire modelli 3D da filmati e a tal proposito l'Arc-Team è attivo in un progetto in corso dal 2005, condotto da Prof. Tiziano Camagna, e che ha come oggetto l'esplorazione del lago Tovel in Trentino. È stato usato a tale scopo un video girato nel 2012 usando una fotocamera GoPro Hero 2. A dispetto dell'acqua torbida del lago, il risultato è stato eccellente, risultando in un modello eccellente (Fig. 46) da video nonostante la scarsa visibilità e la ridotta illuminazione in fondo al lago.

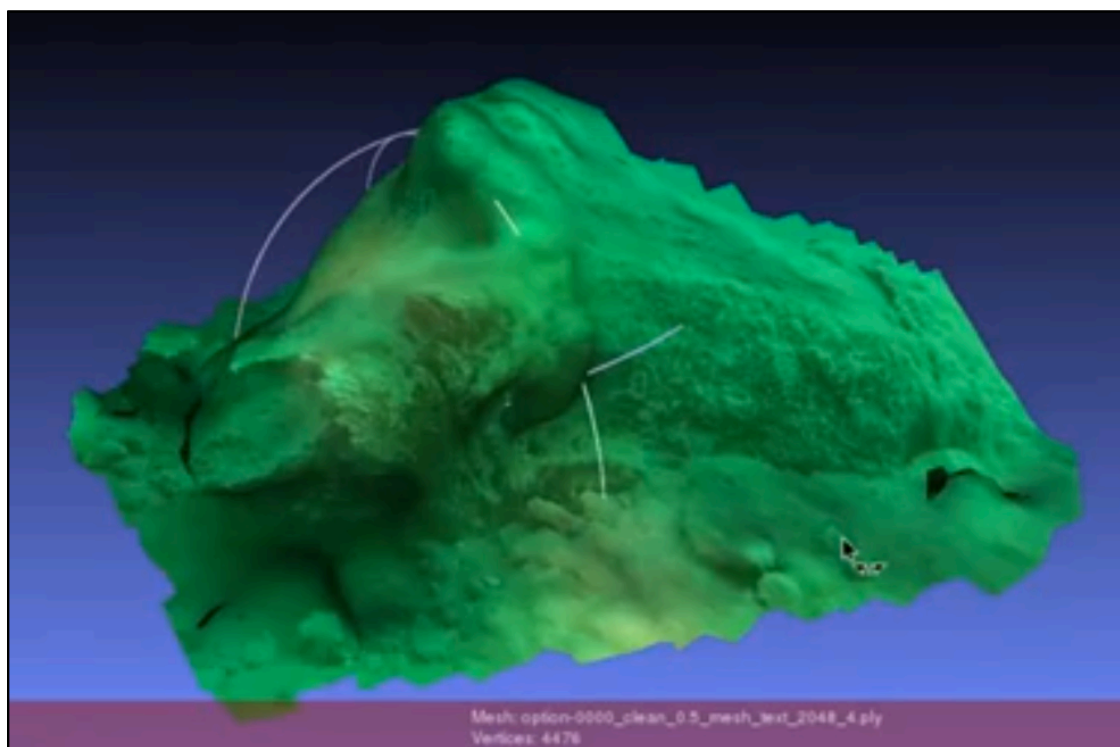


Fig. 46. Il risultato dell'applicazione di SfM/IBM da video in un contesto subacqueo

3. INTERPRETAZIONE

Le applicazioni di Realtà Virtuale, ormai nota da almeno due decenni, dopo numerose riflessioni e discussioni in proposito, potrebbero essere definite come simulazione di ambienti reali o immaginati¹¹⁰. I modelli 3D sono considerati uno strumento per comprendere, rappresentare e analizzare la complessità del mondo reale -presente e passato- comprendendone i problemi o predicendo l'andamento di alcuni fenomeni. Da alcune ricerche in psicologia cognitiva è emersa una forte relazione tra la capacità di visualizzare e l'uso di strumenti di visualizzazione per percepire le informazioni in modo più appropriato¹¹¹. Il processo di visualizzazione di informazioni punta principalmente ad amplificare la cognizione umana con opzioni differenti in modo da facilitare l'associazione dei dati al significato ed estendere le capacità di interpretazione o di decodifica dell'utente. Il processo di rappresentazione delle informazioni si può riassumere nella trasformazione di dati, informazioni e conoscenza in forma visuale; gli ambienti virtuali forniscono una comprensione profonda del valore dei dati. La Realtà Virtuale permette dunque di vedere in tre dimensioni concetti, oggetti e spazi e la loro contestualizzazione offre una struttura visiva che mostra i dati, consentendo l'interazione fra esseri umani, dati e informazioni¹¹². Inoltre trasforma le informazioni rendendole più accessibili all'occhio umano e percettibili con più facilità. La Realtà Virtuale inoltre fornisce all'utente significati multipli che si sviluppano man mano che lo spazio viene interpretato. Viene a crearsi quindi una sorta di dualismo fra "spazio virtuale" -spesso connesso a un contesto immaginario- e "spazio reale", più vicino alla nostra esperienza o alla vita di ogni giorno. Il processo di attribuzione di un significato dipende da conoscenza pregressa. Quanto

¹¹⁰ Roberts, Ryan 1997

¹¹¹ Hermon, Kalisperis 2011

¹¹² Frischer *et al.* 2002

questa sia estesa dipende da quanto si conosce e da quanto si è abili a interrogare e usare ciò che si conosce. Le informazioni provenienti da una serie di campi di conoscenza possono contribuire alla costruzione del significato¹¹³. Dunque l'informazione diventa il punto di contatto tra il reale e il virtuale. Nel caso di modelli 3D proposti per spiegare un certo contesto archeologico, la Realtà Virtuale diventa un'attività che richiede un processo di "*decision making*" basato su informazioni provenienti da fonti differenti che offrano varie possibilità al visitatore. Tornando alla frase iniziale di Walter Benjamin¹¹⁴, dal momento in cui gli oggetti creati dall'uomo sono imitabili e replicabili e ne vengono continuamente create delle copie, ci si domanda in che misura la Realtà Virtuale, vista come la replica di qualcosa, possa riprodurre l'originale. Uno degli aspetti negativi di questa replica può essere però il grado di somiglianza con l'originale. Dunque, quando ci si appresta a creare un modello virtuale di qualcosa di esistente o passato, ci si deve chiedere quale aspetto dell'originale si vuole catturare e visualizzare. L'esperienza della Realtà Virtuale ha più livelli, non è "la realtà" ma la rappresentazione di una o più istanze che possono variare in circostanze e contesti differenti. Un aspetto fondamentale è aver presente in anticipo se lasciare che l'utente scelga cosa osservare, oppure considerare il contesto da cui proviene il potenziale utente e la sua cultura applicando un approccio orientato verso di esso. Tutta l'interpretazione è necessariamente situata nella storia; la posizione nella storia, la cultura di chi interagisce, influisce sul significato. Il significato è costruito attraverso e all'interno della cultura; la percezione, la memoria e il pensiero logico differiscono culturalmente perché sono costruzioni culturali¹¹⁵. Con queste premesse, la sfida più complessa è trovare un metodo di comunicazione e interpretazione che possa essere compreso e apprezzato da diversi tipi di pubblico con

113 Hooper-Greenhill 1999

114 Benjamin 1969

115 Hooper-Greenhill 1999

background differenti. Dall'esperienza personale sviluppata come copywriter per guide turistiche a carattere divulgativo emerge che molti visitatori, soprattutto occidentali e con un retroterra storico medio, immaginano Roma antica completamente marrone (probabilmente perché un'immagine mutuata da *videogame* e film d'animazione) mentre un archeologo la immaginerebbe bianca e colorata da marmi e decorazioni.

"VR should be regarded in our opinion as a dialogue between the characteristics of the real object and the user, VR being not a digital "monolith", but rather an entity with a "changing shape" and a "shifting geometry", allowing the creations of different "metaphors".¹¹⁶ Dunque non una "verità oggettiva" che si rifaccia al "vedere per credere" di Platone ma una verità fra altre possibili¹¹⁷. La creazione di un ambiente virtuale non è solo una questione legata alle tecnologie ma soprattutto alla forma di conoscenza che si vuole infondere allo spettatore. Quando si crea un ambiente virtuale si dovrà essere coscienti del fatto che si sta usando un linguaggio differente per raccogliere, riunire e comunicare la conoscenza. Dunque bisogna saper bilanciare la semplicità del messaggio con la complessità della struttura con cui si trasmette soprattutto tendendo presente che non si può ridurre l'utente a un osservatore passivo. La Realtà Virtuale invece fa scattare una modalità intuitiva per l'elaborazione dei dati. *"We can thus refer to the (VR) medium using the Aristotelian terms of mimesis, emphasizing its characters as a form of artistic imitation, which strengthens the relationship between user and technology, and encourages the user of a technology to develop a first person, rather than third-person relationship with his or her mediated environment"¹¹⁸*. Una volta deciso cosa riprodurre virtualmente e come, emerge il problema di come rappresentarlo; il significato degli oggetti virtuali e le loro relazioni in una scena forniscono un'immagine alternativa

116 Hermon, Kalisperis 2011

117 Hermon *et al.* 2005

118 Steuer 1992

dell'oggetto reale¹¹⁹ che crea nell'utente un'idea precisa difficile da immaginare con forme diverse.

3.1. Interpretare in 3D: un metodo trasparente e sostenibile

Nel corso dell'analisi dei dati di Cencelle che sarebbero diventati modelli 3D per la visualizzazione, un'enorme difficoltà riscontrata è stata di dover reinterpretare dati che erano stati interpretati ormai molti anni prima da chi aveva scavato. Da qui sono scaturite due necessità: quella già ampiamente enunciata di una documentazione 3D in tempo reale e quella di una *pipeline* interpretativa che andasse dalla fonte al dato scavato, alla visualizzazione fino alla comunicazione. Per questo non bastano gli strumenti software, ma si deve stabilire di comune accordo una linea, una sequenza di azioni che permettano a persone diverse in tempi diversi, di inserirsi perfettamente nel processo di acquisizione e interpretazione.

Nelle direttive di “*The London Charter*”, già citata in precedenza, si parla della necessità che ci sia una documentazione sistematica delle fonti utilizzate, delle decisioni prese in corso d'opera e delle interpretazioni fatte nel corso della visualizzazione così da rendere il ragionamento scientifico trasparente e la visualizzazione credibile a livello accademico, sia per ricerca sia per divulgazione. La parola chiave in questo processo è “Paradato”. Baker definisce i paradata come: “*describing the processes of interpreting and creating data objects in order to enable understanding and evaluation*”¹²⁰. Dunque, al contrario dei metadati che descrivono caratteristiche proprie dell'oggetto (misure, collocazione, ecc.) e sono quindi oggettivi, i paradata sono soggettivi e rappresentano l'insieme delle discussioni e decisioni che hanno portato a un certo tipo di visualizzazione; l'equivalente delle note a pie' di pagina. Tale lavoro è solo un input (data la mole di dati che restano ancora da trattare) per creare una piattaforma che permetta di produrre una visualizzazione 3D

119 Hermon *et al.* 2005

120 Baker *et al.* 2012

dei dati assolutamente trasparente, semplice da modificare -sulla base di nuove acquisizioni- e migliorare. Questo è l'unico modo per evitare che dati proposti in un ambiente virtuale o interpretati in 3D possano essere considerati meno credibili, soprattutto dagli studiosi. Allo scopo bisogna partire dalle fonti tenendo però presente che le fonti stesse sono il frutto di un'interpretazione che ha avuto luogo al momento della loro creazione e adottando i dovuti accorgimenti¹²¹. Un secondo *step* consiste nel mettere a confronto le fonti; un'operazione che permette di identificare corrispondenze, inconsistenze e differenze.

Nel caso di Cencelle e in particolare per l'edilizia abitativa, i confronti sono stati fatti fra fonti catastali e fonti iconografiche dell'epoca, per arrivare a definire in molti casi l'unicità del sito, sia nelle strutture (abitazioni analoghe nel circondario hanno aperture ad arco in bugnato, ma a Cencelle non c'è evidenza di conci che giustificano tali strutture) sia nella stratigrafia (il fatto che gli strati più in basso nelle abitazioni siano i più recenti).

Nella terza fase vanno create possibili ipotesi con relative conclusioni in modo che si formalizzi il processo di interpretazione, volto a mostrare differenti possibili alternative in una sorta di struttura ad albero. Infine la visualizzazione deve poter essere implementata soprattutto per quanto riguarda le fonti. Una nuova fonte potrebbe portare infatti alla necessità di cambiare il modello. Riuscire a inserire un metodo simile nel contesto di scavo è, ad avviso di chi scrive, la base per riuscire a integrare la visualizzazione 3D con l'indagine sul campo¹²². Solo in questo modo la rappresentazione 3D può essere considerata come un'entità evolvente e integrabile all'interno di un progetto di ricerca in movimento.

121 Pletinckx 2012, p. 204

122 Pletinckx 2012, p. 213

3.2. Il processo interpretativo applicato a Cencelle: “ricostruzione” o “modello”?

Nel corso dell'elaborazione dei dati 3D di scavo e nella conseguente creazione di modelli tridimensionali che aiutassero la visualizzazione e la comprensione, alla luce di una terminologia usata spesso in maniera non appropriata e di un dibattito¹²³ ancora in corso, si è optato volutamente per evitare l'uso del termine “ricostruzione”, per quello che si preferisce considerare un tentativo di comprensione, fornendo varie ipotesi possibili, degli spazi della città e del loro uso. Secondo il dibattito citato, infatti, il concetto di “ricostruzione” può risultare problematico e inappropriato¹²⁴. Spesso viene riferito alla descrizione del passato basata su materiali archeologici ricreati virtualmente, disegnati, immaginati e costruiti in scala. Spesso è un termine fuorviante, dal momento che implica l'idea di “costruire nuovamente” il passato¹²⁵ e fa pensare che qualcosa venga ricreato esattamente com'era anche quando i resti di un edificio o di un oggetto non permettono di fatto una ricostruzione. L'interpretazione dell'oggetto ricostruito può essere ambigua e incerta (come anche il termine “restituzione”) senza contare che è impossibile ri-creare il passato da informazioni che per forza di cose resteranno incomplete. Si opterà dunque per il termine “modellare” o “visualizzare”¹²⁶ dal momento che si tratta di creare un modello, simile a quelli geografici o matematici. Il modello è uno strumento che può aiutare a comprendere un fenomeno complesso, ma allo stesso tempo una semplificazione e senza dubbio non è il punto d'arrivo della ricerca. Il fine di questa, infatti, non è mostrare un'immagine accurata del passato, che sarebbe una sfida impossibile, ma fornire una visualizzazione che aiuti le ipotesi degli studiosi o le idee di un normale osservatore sempre con la consapevolezza legata all'incertezza

¹²³ Hermon *et al.* 2005

¹²⁴ Baker *et al.* 2012, p. 164, Pletinckx 2012, p. 203

¹²⁵ Clark 2010, p. 63

¹²⁶ Clark 2010, p. 67

dell'interpretazione. Un'altra finalità della visualizzazione 3D può essere l'esposizione di quel processo che ha alle spalle la raccolta di dati e fonti¹²⁷ dal momento che il prodotto finale non è altro che un'interpretazione dei dati archeologici disponibili, per forza di cose incompleti. L'incomprensione di base sta nel fatto che la maggior parte delle visualizzazioni archeologiche tridimensionali sono sempre state realizzate e considerate come un mezzo per comunicare l'archeologia, senza valutarne le potenzialità intrinseche legate al loro diretto utilizzo ai fini della ricerca¹²⁸. Costruire un'interpretazione 3D connettendo tutti i dati propri dell'indagine archeologica, influenza profondamente l'interpretazione stessa. La visualizzazione dunque è un punto di partenza fondamentale per l'interpretazione del materiale archeologico proprio perché nel momento in cui questo deve essere interpretato, i modelli tridimensionali permettono di confrontare direttamente e in tempo reale (Figg. 59-64) le caratteristiche geometriche del contesto investigato e le differenti interpretazioni¹²⁹ prodotte nel corso dell'indagine¹³⁰ archeologica. Come sperimentato anche per alcuni ambienti di Cencelle¹³¹, il processo di rappresentazione tridimensionale può portare a rivalutare alcune teorie con una più profonda comprensione dei dati, così da poter andare oltre ciò che è stato scavato. In questo senso la Realtà Virtuale è uno strumento prezioso per elaborare e confrontare ipotesi multiple su una piattaforma comune di visualizzazione¹³². Inoltre tale metodo risulterebbe molto più economico in termini di tempo, utilizzando contestualmente un approccio sperimentale e piattaforme di calcolo per

127 Pletinckx 2012, p. 205

128 Hermon *et al.* 2005

129 Cfr. Capitolo 4

130 Hermon 2012, p. 21

131 Come verrà illustrato nel capito seguente, nel corso della documentazione e modellazione in 3D ci si è resi conto che, durante le varie campagne di scavo svolte in tempi differenti, ambienti con caratteristiche simili erano stati interpretati come aree con funzioni diverse.

132 Hermon 2012

costruire esperimenti di visualizzazione. In tal modo l'ambiente virtuale costituisce la piattaforma stessa dove i dati archeologici e le ipotesi interpretative possono essere analizzate in maniera critica fino a visualizzare il ragionamento archeologico¹³³.

Il secondo passo, dopo l'integrazione delle metodologie 3D per la documentazione dello scavo a Cencelle, sarà dunque il tentativo di integrare come prassi l'interpretazione di strati, edifici, oggetti dal 3D, come valore aggiunto ai dati e come fonte per nuove domande di ricerca. Anche in questo caso si tratta di un processo lungo e complesso che non può prescindere dall'identificazione di un metodo condiviso e soprattutto dalla formazione degli archeologi ad affrontare oltre che il lavoro sul campo, anche quello di misura e calcolo. Un simile approccio porterebbe senz'altro alla creazione di nuove domande di ricerca e alla possibilità di analizzare, rivedere, implementare dati acquisiti anche dopo lungo tempo.

3.3. Interpretazione da 3D: da Londra alla University of Queensland: “*Establishing the Conditions for Performance of Christopher Marlowe’s Dr Faustus in a Virtual Model of London’s 1594 Rose Theatre*”

Apparentemente lontano dal mondo dell'archeologia, l'esperimento condotto fra Regno Unito e Australia nell'ambito delle *performing arts* ha costituito lo spunto e l'ispirazione per il presente lavoro e per l'elaborazione di un progetto più ampio per Cencelle, dove tecniche come la *Motion Capture*¹³⁴ unitamente ai metodi ormai attestati come l'archeologia sperimentale, potrebbero aiutare a comprendere l'uso degli

¹³³ Hermon 2012, p. 22

¹³⁴ “*Motion Capture as a technique is most commonly used for special effects in movies and rehabilitation diagnostics at hospitals. However, this technique has found its way into domains such as cognitive science and linguistics*”. Piccoli *marker* attaccati alle parti del corpo, forniscono informazioni per costruire le traiettorie di un modello 3D. Le misure che fornisce una tale tecnica sono accurate al centesimo di secondo e al millimetro: tale tecnica permette di quantificare con simile precisione i movimenti nello spazio reale. <http://projekt.ht.lu.se/ccl/techniques/motion-tracking/>

spazi e a reinterpretarli alla luce dell'interazione umana reale espressa in un ambiente virtuale.

Partendo dal concetto di “*aura*”¹³⁵ espresso da Walter Benjamin e con l'aiuto di piattaforme digitali, Johanne Tompkins, della University of Queensland ha realizzato una rappresentazione virtuale del *Dr Faustus* di Marlowe, osservando e studiando un attore che recitava su un palco virtuale, i cui movimenti erano “catturati” mediante *Motion Capture*. La scena “virtuale” riproduce il Rose Theatre di Londra; la rappresentazione virtuale dell'opera è stata situata in questo luogo specifico e collocata storicamente nel tardo XVI secolo. L'idea è che la tecnologia, coniugata a questa sorta di ri-messa in scena, può mediare il modo in cui vengono trasferite conoscenza ed esperienza e può sovvertire completamente questi concetti. Gli strumenti digitali di cui si dispone attualmente hanno la capacità di trasformare il metodo di ricerca partendo dal presupposto che il teatro è sempre stato “virtuale” e d'aiuto nel comprendere la definizione di realtà. L'oggetto di studio del progetto è stato il *Dr Faustus*, un'opera di Christopher Marlowe rappresentata a Londra nel tardo XVI secolo. A questo fine è stato creato un modello virtuale del teatro in cui era noto che quest'opera fosse stata rappresentata -il Rose Theatre- utilizzando gli strumenti che generalmente sono usati per la conservazione del patrimonio culturale. La rivisitazione tecnologica di una rappresentazione storica e la riproduzione del luogo in cui questa si svolgeva, permettono di accrescere l'esplorazione della storia del teatro e le sue implicazioni. Due strumenti sono stati fondamentali per il progetto: un ambiente ri-creato virtualmente e la *Motion Capture*. L'ambiente virtuale, storicamente accurato, rimane statico fino a che l'attore fa il suo ingresso ma inizia ad acquisire significato e a trasmettere conoscenza solo quando vi viene

135 L'aura secondo Benjamin è un singolare intreccio di spazio e di tempo: l'apparizione unica di una lontananza, per quanto questa possa essere vicina. È qualcosa di inaccessibile e elusivo. Generalmente è associata con la nozione di opera d'arte nel XIX secolo, e all'avvento della fotografia che all'inizio tentava di imitare la pittura, ma rapidamente e per via della natura della tecnologia fotografica, ha contribuito alla distruzione di tutte le nozioni di “belle arti”. L'unica eccezione per Benjamin è il cinema. (Benjamin 1969)

inserita la *Motion Capture* dell'attore; anche quest'ultima perde la sua specificità se non è integrata in un ambiente. Il progetto quindi punta a combinare e integrare due rappresentazioni: una "catturata" nella realtà, l'altra costruita dalla storia nel "virtuale". La ricerca si è concentrata sul Rose Theatre (anziché sul più noto Globe Theatre) proprio perché, quando nel 1989 vennero portate alla luce le fondazioni del teatro, si puntò a comprendere come dovesse apparire quel luogo quando l'opera di Marlowe vi fu rappresentata per la prima volta. Si aspettava con ansia di sapere, dai risultati degli scavi, quali potessero essere le sue dimensioni, quante gallerie avesse, quale fosse la forma del palco, dove fosse posizionato e quali fossero la visuale del pubblico e degli attori. Purtroppo lo scavo archeologico non bastò a dare tutte le risposte, dal momento che non fu completato (un terzo delle fondazioni non fu scavato) per poter dar via ai lavori di costruzione dell'edificio che era previsto in quella sede e per mancanza di fondi (oggi l'area è coperta da cemento e sabbia per essere preservata). A quel punto si decise di realizzare un modello virtuale di questo piccolo teatro dalla forma irregolare per capire come potesse apparire e -soprattutto- come funzionasse. Tutto ciò tenendo presente che le rappresentazioni, anche quelle più antiche, oggi differiscono sicuramente dallo stile dell'epoca di Shakespeare. Tentare di "catturare" una rappresentazione e metterla in scena in un modello accurato del teatro in cui si era svolta poteva aiutare a comprendere meglio la natura della rappresentazione stessa e il luogo che l'aveva ospitata.

Il modello del teatro è stato creato da Ortelia, una società di Brisbane che si occupa di creare modelli virtuali di spazi culturali reali. In questo caso la società ha un ambiente virtuale generato dalla geometria e dalle dimensioni del sito attuale e dalle fondazioni scavate del teatro. Si tratta di un modello ad alto livello di dettaglio. Per comprendere quali fossero le strutture del teatro originario, una versione più piccola di un teatro elisabettiano, la riproduzione si è basata sui confronti con il più famoso

Globe Theatre e la sua ricostruzione moderna a Londra. Generalmente si trattava di luoghi aperti dalla forma ottagonale o poligonale con due o tre livelli di posti a sedere intorno al palco, un pozzo per il suggeritore e uno spazio aperto al centro per il pubblico in piedi. Naturalmente non c'era una forma unica per i teatri elisabettiani, ma questa sembra essere la più accreditata e soprattutto la più riprodotta (anche nel cinema). I modellatori che hanno creato questa versione del Rose Theatre, hanno usato come base gli articoli seguiti agli scavi, una volta stabilite le altezze delle volte, delle scalinate, i metodi costruttivi, il tipo di legno corretto (quercia), i materiali e persino l'altezza media dei cittadini inglesi nel XVI secolo a Londra. Un'altra caratteristica del modello è la sua facile modificabilità, così da renderne possibili aggiornamenti con versioni che possano emergere da nuove testimonianze storiche. Il secondo aspetto del progetto è la *Motion Capture*: inserire un attore che recita dal vivo all'interno di uno spazio storico è una sfida anche per l'attore stesso e per chi lo dirige, oltre che per l'animatore. Nel momento in cui l'attore entra nell'ambiente virtuale è possibile esplorare altre caratteristiche del teatro come ad esempio l'attore in relazione a uno spazio piccolo o alla visuale del pubblico. Ad esempio, il fatto che il palco sia molto piccolo mette l'attore di fronte alla necessità di muoversi e recitare in modo diverso rispetto che nel Globe Theatre, edificio di gran lunga più grande. Inoltre anche l'area dietro alle quinte è di dimensioni estremamente ridotte. Una volta inserito l'attore nello spazio, c'è il bisogno di aggiungere altri oggetti, propri delle rappresentazioni che sicuramente si svolgevano in quel luogo. La scelta del *Dr Faustus* è legata proprio al numero di oggetti che devono essere in scena durante il monologo finale, prima che il protagonista venga portato all'inferno: un tavolo per banchetti, un trono vuoto e un meccanismo che riproduca la bocca dell'inferno. Dal modello emerge che la zona dietro le quinte è troppo piccola per contenere tutto il materiale scenico, e questo spiega la presenza del capanno che secondo le fonti fu costruito sul retro del teatro. In seguito si è modellato il materiale di

scena, sia per verificare quanto spazio effettivamente fosse disponibile per conservarlo sul retro, sia per valutare l'interazione del personaggio con questi oggetti, in particolare la bocca dell'inferno. Sono poi state modellate le altre figure, attori e pubblico, per popolare la scena con le varie migliaia di spettatori che il Rose Theatre poteva contenere. Fondamentali sono il punto di vista e la visibilità; quanto riusciva il pubblico a vedere bene gli attori e viceversa? Il modello ha dimostrato che il teatro era piuttosto scuro; senza luci aggiuntive (torce, lampade, candele), per chi sedeva nelle gallerie sarebbe stato davvero arduo raggiungere un posto libero facendosi strada attraverso passaggi angusti. È noto inoltre che alcuni spettatori, per ingannare il tempo, portavano con sé il copione della rappresentazione, ma secondo il modello, a meno che non si trovassero in prima fila nella galleria, essi avrebbero avuto serie difficoltà a vedere senza luce artificiale. Resta ancora da esplorare come fosse illuminato il teatro per permettere la lettura, dal momento che ogni forma di illuminazione avrebbe prodotto pericolo d'incendio e una discreta quantità di fumo, peraltro oscurando la visuale. Inoltre il tempo atmosferico di Londra non contribuisce certamente ad una buona illuminazione naturale. Da questo punto di vista, il modello incorpora due tipologie meteorologiche: un assolato giorno di Luglio alle due del pomeriggio a Londra e la sua versione nuvolosa. Il palco era posizionato in modo che gli attori non avessero il sole negli occhi (sempre che questo ci fosse); in realtà il sole che entrava attraverso l'apertura superiore dava molta luce solo nei giorni più limpidi, inoltre l'altezza notevole del teatro (rispetto al suo diametro) restringeva l'illuminazione a una piccola porzione, fattore tale da rendere difficile al pubblico la vista degli attori e viceversa (Fig. 47). Una logica deduzione è che i fenomeni atmosferici abbiano influito sul modo che avevano gli attori di recitare la propria parte.



Fig. 47. Il modello del Rose Theatre di Londra con gli *avatar* di attori e pubblico in azione

Un altro punto fondamentale riguarda l'interazione fra l'attore-*avatar*¹³⁶ e i visitatori virtuali che possono interagire con lui. Usare la *Motion Capture* risulta molto più economico che modellare un personaggio animato a cui attribuire tutti i movimenti: nella *Motion Capture* è l'attore stesso ad imprimere i movimenti all'*avatar* offrendo una visione più realistica. Inoltre con questo metodo è possibile creare delle relazioni fra il personaggio e gli oggetti nel momento in cui la programmazione ne rileva una mutua interazione. Lo spazio in cui l'attore si muove dunque diventa un volume che replica lo spazio a disposizione per la rappresentazione nella scena 3D. Il lavoro presentato fornisce dunque una prospettiva sull'incarnazione della relazione tra tecnologia, memoria ed esperienza soprattutto alla luce del fatto che il teatro è sempre stato intrinsecamente virtuale, quindi un mezzo per capire come definire la realtà¹³⁷.

3.3.1. Reassessing Cencelle: a quantitative archaeology evaluation

Le conclusioni a cui sono giunti gli autori del progetto presentato nel paragrafo precedente sono focalizzate prevalentemente sulla

¹³⁶ Un Avatar è la versione digitale di chi visita l'ambiente, generalmente guidato dall'utente.

¹³⁷ Delbridge Tompkins 2012

rappresentazione teatrale e sul ruolo e i movimenti dell'attore, dal punto di vista delle *performing arts*, ma a parere di chi scrive rappresentano una possibilità ulteriore per l'analisi di un contesto archeologico che presenti resti di strutture identificabili.

Una tale riflessione ha gettato le basi per un progetto futuro che possa valutare e interpretare lo spazio degli edifici di Cencelle (le abitazioni, le botteghe, la chiesa) con l'ausilio di archeologia sperimentale e strumenti 3D. Quanto spazio richiedeva la lavorazione dei metalli? È attendibile l'interpretazione dell'uso di alcuni ambienti come officine? Come si svolgevano le funzioni all'interno delle chiese (Fig. 48*bis*)? Come erano disposti i fedeli nel corso del rito del battesimo, attestato nella chiesa medievale? Riprodurre un fabbro al lavoro nei quartieri artigianali di Cencelle, con una tecnica analoga a quella presentata significherebbe valutare metricamente la coerenza dello spazio con l'azione dell'uomo e conseguentemente porterebbe a trarre conclusioni su quanto siano corrette le ipotesi elaborate finora.

In tale ottica Cencelle si presta a una ri-misurazione e a una ri-valutazione delle funzioni grazie a tecnologie come *Motion Capture* e modellazione 3D. L'idea è quella di unire tecniche tradizionali ai più moderni strumenti di *computer graphics* per identificare e misurare gli ambienti di lavoro e quelli della vita quotidiana. Il punto di partenza sono le acquisizioni 3D effettuate nel corso del 2012 e altre che è auspicabile arrivino con campagne future. Aggiungere personaggi animati a questi modelli permette di definire in maniera più accurata la disposizione degli ambienti, la posizione delle suppellettili e le misure delle stanze in una città di fondazione medievale.

Partendo da un tale presupposto, la disponibilità di un fattore umano misurabile in modelli 3D metrici può aiutare:

- a comprendere quanto spazio richiedesse e utilizzasse l'interazione umana;

- a interpretare come erano disposti gli ambienti delle botteghe in modo da permettere l'utilizzo di specifici attrezzi di lavoro;
- a ottenere misure accurate dell'ampiezza e degli angoli dei gesti, al fine di predire quanto spazio richiedesse lo svolgimento di una certa azione;
- a ottenere personaggi in grado di interagire con il modello 3D.

Al fine di comprendere e misurare forme e spazi si ipotizza l'utilizzo di tecniche differenti:

- 1) Archeologia sperimentale: archeologi in grado di maneggiare correttamente strumenti dell'epoca che riproducano la gestualità degli artigiani di Cencelle;
- 2) *Motion Capture Systems*: i movimenti degli archeologi sperimentali (Fig. 48) o degli attori vengono tracciati mentre impersonano un fabbro, un chierico, ecc., attraverso un sistema di *Motion Capture*. Questa tecnologia, introdotta nel campo della ricerca archeologica, permette di modellare personaggi con movimenti e attributi umani realistici. Il suo uso in modelli 3D di carattere archeologico costituisce un'area di ricerca davvero promettente. I dati acquisiti dalle camere vengono elaborati per generare personaggi 3D animati che infine possono essere inseriti nei modelli 3D degli edifici¹³⁸.

138 <http://project.ht.lu.se/en/ccl/techniques/motion-tracking>



Fig. 48. Un esperto di archeologia sperimentale simula una battaglia coperto di *marker* che tracciano i suoi movimenti con la *Motion Capture*

Il periodo di internazionalizzazione svolto in Svezia nell'ultimo anno è stato proficuo per l'acquisizione di conoscenza sulle tecnologie descritte, e soprattutto ha gettato le basi per una futura collaborazione. L'università di Lund ha acquisito notorietà nell'utilizzo delle tecniche illustrate sopra, e chi scrive ha avuto il privilegio di partecipare alle attività dello *Humanities Lab*, che le sviluppa in collaborazione con il dipartimento di Archeologia.

I metodi e le tecniche appena enunciati potrebbero produrre- se applicati a un contesto come quello di Cencelle- accurate interpretazioni metriche dello spazio utilizzando ambienti completamente virtuali. Naturalmente Cencelle è solo una delle innumerevoli possibili applicazioni, dal momento che molti altri contesti si presterebbero a questo tipo di tecnologia. Ad esempio (perché no?) i portici di Bologna, dove si potrebbe analizzare lo spazio occupato dagli artigiani per le loro attività. L'aggiunta di oggetti modellati, corrispondenti a quelli reali (ad esempio le vaschette, i modelli dei banconi litici, gli arredi liturgici) oltre a permettere di valutare in maniera più realistica lo spazio, consentirebbe di rendere lo scavo più comprensibile ai visitatori, dando l'idea di un ambiente vivo nel quale, come per un improvviso capovolgimento dei ruoli della tecnologia,

l'elemento di "realtà aumentata" -costituito dall'uomo che agisce e interagisce con il virtuale- è proprio quello "reale".



Fig. 48bis. L'ambiente virtuale della cripta esportato in MeshLab, che si potrebbe popolare con i riti o cercando di interpretarne l'uso (forse una prigione?) dopo l'abbandono

4. COMPrensione

In questo capitolo si illustra la fase finale del processo di “documentazione > interpretazione > comprensione” dei quartieri residenziali di Cencelle, sfociata, dopo un’accurata analisi delle fonti, confronti e interpretazione dei dati di scavo, in un esperimento di modellazione filologica degli spazi. Le finalità di questo tipo di visualizzazione sono varie e rivolte a destinatari differenti:

- rendere più comprensibile quale fosse l’aspetto dei lotti abitativi;
- creare una piattaforma di visualizzazione tridimensionale dello stato attuale degli edifici;
- integrare i due metodi ai fini della formulazione di ipotesi condivise sull’aspetto, la funzione, la storia dell’edilizia residenziale nella città;
- avanzare ipotesi di comunicazione.

Nello sviluppo di progetto si è pensato di partire dal passato più prossimo: i dati e la documentazione cartacea acquisiti dall’inizio dello scavo; per poi passare al presente, con le *mesh* ottenute dalle scansioni con *laser scanner* degli edifici superstiti; tornare al passato più remoto con i modelli filologici elaborati con Blender da sovrapporre all’esistente per comprenderne l’affidabilità. Tutto questo pensando a un futuro di integrazione delle tecnologie 3D all’interno dello scavo e nella successiva interpretazione dei dati.

La fase di comprensione, come immaginabile, non è un processo finito, ma prosegue con lo scavo e si arricchisce con nuove acquisizioni: si è fatto in modo che i modelli fossero leggeri -in termini di dimensioni in kByte-, facilmente gestibili e facili da aggiornare sia con nuovi modelli sia con modifiche suggerite da riflessioni successive (si veda più avanti la questione legata alla tipologia delle aperture).

Nel corso della realizzazione dei modelli sono scaturite nuove domande e nuove possibilità legate all’assetto o alla disposizione o alla natura stessa

dell'edificio. Chi aveva scavato, ormai quasi un decennio prima, aveva tratto le sue conclusioni sull'aspetto che potevano avere gli edifici, basandosi anche sui materiali rinvenuti. Alla luce di una comparazione dei dati disponibili per creare una visualizzazione 3D, avendo di fronte l'aggregato di gran parte della documentazione di anni diversi, spesso si sono aperte strade verso nuove ipotesi possibili e altrettanto plausibili. Un ostacolo a tratti insormontabile, legato alla distanza fisica e ai cambiamenti nella gestione dello scavo nel corso degli anni, ha riguardato l'impossibilità di interagire con chi aveva scavato in passato, per avere un confronto sull'attendibilità e l'affidabilità delle nuove ipotesi formulate. Questo fattore ha rafforzato l'idea di realizzare una piattaforma aperta, costituita dai modelli frutto delle acquisizioni con *laser scanner* e *Computer Vision*, quindi rispondenti alla realtà attuale, o comunque "congelati" allo stato in cui si trovavano al momento dell'acquisizione, aggiornabili con la visualizzazione tridimensionale delle ipotesi sulla loro funzione. Grazie alla digitalizzazione, oltre alla funzione di documentazione, si risponde anche a un bisogno di fermare la naturale usura cui vanno inesorabilmente incontro le strutture, mantenendo traccia delle loro caratteristiche al momento dell'acquisizione. Comprendere la funzione degli ambienti, l'organizzazione dello spazio, le attività che vi si svolgevano, rimane una domanda aperta a tutte le risposte che i progressi della ricerca su un abitato medievale potranno dare, campagna dopo campagna.

4.1. L'Edilizia residenziale a Leopoli-Cencelle

Come noto dalle pubblicazioni sullo scavo di Leopoli-Cencelle¹³⁹ molti dei dati sull'edilizia abitativa della città si fermano all'ultima sua fase di vita, a causa dell'asportazione, da parte degli abitanti, di gran parte della stratigrafia precedente al fine di ampliare gli ambienti. Le tipologie edilizie

139 Ermini Pani 1999

a Cencelle sono varie e riconoscibili, purtroppo influenzate da preesistenze che non è dato conoscere del tutto.

La fase più antica dà vita ad insediamenti di strutture lignee, testimoniate da buche di palo, che lasciano ipotizzare un primitivo insediamento in materiali deperibili quali legno e paglia, sostituito in una seconda fase da edifici in muratura.

La parte attualmente visibile delle strutture corrisponde in linea di massima all'aspetto che queste potevano avere al momento dell'abbandono o poco prima (quando dei resti che hanno subito rimaneggiamenti o modifiche evidenti permettono di avanzare delle ipotesi plausibili). In questa fase a Cencelle si osserva un'edilizia in muratura che si può equamente suddividere tra:

- edifici adibiti ad attività produttive;
- strutture abitative per ceti più agiati (torri e case-torri);
- case a schiera;
- case a corte.

Un punto d'unione tra le categorie è costituito da isolati che spesso hanno più funzioni, come accade nel settore III.

L'edilizia residenziale per ceti più abbienti si riconosce da una maggiore cura nelle tecniche e dall'impianto dell'edificio che aiuta a distinguere una torre o una casa-torre (Fig. 10) dalla pianta quadrangolare, scarse decorazioni, suppellettili e aperture, soprattutto nel primo caso (quando si tratta di una torre prevalentemente deputata alla difesa). Nell'edilizia di livello più alto sono riscontrabili anche case con portico, probabilmente con la medesima funzione di protezione-transito che potevano avere in città come Bologna¹⁴⁰. Nella città di fondazione leoniana se ne ritrovano esempi tra le case a schiera del settore I e del settore VIII.

140 Bocchi, Ghizzoni, Smurra 2002

Nell'edilizia comune sono attestate tipologie riscontrabili nelle zone limitrofe, ma anche nel resto d'Italia. Il confronto con Viterbo o Tarquinia o altri comuni della Tuscia, ad esempio, fa sì che alcuni esempi di case con "profferlo"¹⁴¹ siano facilmente individuabili anche nella tipologia delle case a schiera.

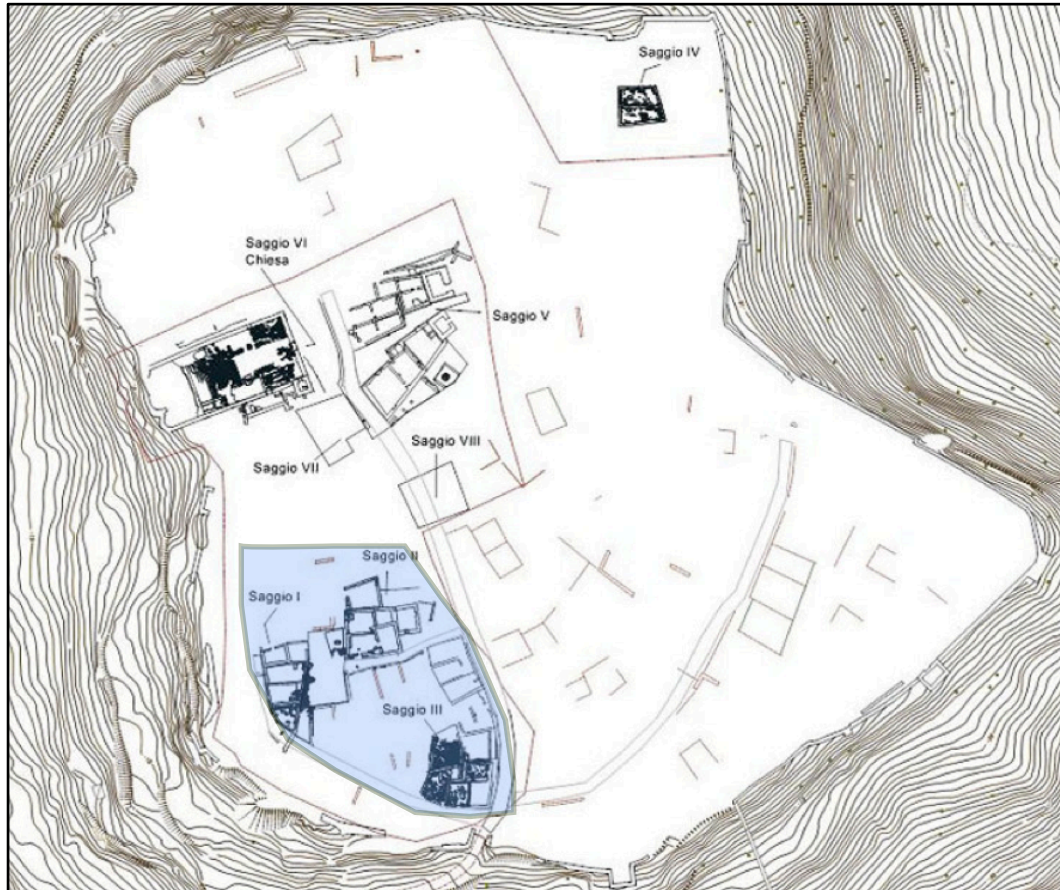


Fig. 49. In evidenza i lotti di edilizia residenziale e artigianale in prossimità delle mura a Cencelle

Data la vicinanza dei lotti analizzati con la cinta muraria (Fig. 49), si può ipotizzare per le parcelle che compongono gli isolati che esse fossero

¹⁴¹ L'elemento architettonico in questione (detto anche "cimasa" nel resto d'Italia) è una scala esterna in pietra, aggettante sulla facciata della casa, parallela o perpendicolare a quest'ultima, aggiunta spesso in un secondo tempo (in genere pieno medioevo ed età comunale), e tale da separare i due ingressi all'abitazione. L'accesso al livello inferiore (generalmente quello della bottega, o del magazzino) viene a trovarsi, quando la scala è parallela alla facciata, al di sotto di questa, mentre all'abitazione si accede dalla scala che dà su un piccolo ballatoio, spesso coperto. (De Minicis 2001)

concesse in enfiteusi¹⁴² (sono possibili confronti con Bologna e le case in enfiteusi del monastero di Santo Stefano¹⁴³) a un gruppo di abitanti che avrebbero dovuto curare le mura. Inoltre, la presenza di tali abitazioni a così poca distanza da queste, lascia supporre che si trattasse di una collocazione conforme agli statuti comunali del 1251¹⁴⁴, che prescrivevano una distanza minima tra abitazioni e mura pari alla gittata di una pietra piccola¹⁴⁵. Ne è nata un'immagine di città che nelle strutture si adegua all'ambiente e che, nonostante la sua storia singolare, non differisce molto dalle altre città ancora in vita che la circondano (Fig. 50).



Fig. 50. Il settore I e il Settore III in foto aeree. Visibile la pianta che segue la conformazione della collina

La conformazione stradale associa vie rettilinee a vie curvilinee quasi a confermare anche per Cencelle quanto il primo insediamento sia ancora

142 L'enfiteusi era un contratto di tipo agrario: prevedeva la concessione ad un enfiteuta di un immobile (o del terreno utile ad edificarlo), per la durata di tre generazioni (99 anni) in cambio di un canone non troppo gravoso. Il concessionario aveva l'obbligo del "miglioramento" (in questo caso, la costruzione della casa). Il sistema era applicato in tutte le città, soprattutto dagli ordini ecclesiastici, ai quali era proibita ogni forma di possesso di beni, anche immobili, come anche la vendita del patrimonio ecclesiastico, destinato ad opere di beneficenza; in questo modo non si disattendeva alle disposizioni canoniche. La concessione in enfiteusi consentiva all'ente ecclesiastico di mantenere la proprietà della terra e di mettere contemporaneamente sul mercato delle aree fabbricabili. La casa costruita dall'enfiteuta restava di sua proprietà, mentre il suolo restava di proprietà dell'ente ecclesiastico. (Bocchi – Ghizzoni - Smurra 2002).

143 Bocchi, Ghizzoni, Smurra 2002

144 Statuti, 1578

145 Cesarini 2001

legato a schemi di tradizione romana¹⁴⁶. Per mantenere la perpendicolarità dei lati lunghi rispetto al percorso, l'ultimo degli edifici che compongono il nucleo delle case a schiera assume un andamento trapezoidale¹⁴⁷. Ulteriore prova di naturalismo nell'urbanistica di Leopoli-Cencelle è il fatto che la via che conduce da questo settore al cuore della città sia *gradata*, segua cioè la naturale pendenza della collina adattandovisi. La scelta delle case a schiera ha evidenziato il fatto che, allora come anche oggi, l'aumento di popolazione induceva a ricercare soluzioni che occupassero il minor spazio possibile e fossero funzionali alla conformazione ed ai bisogni della città. Cencelle, città nata in campagna, sopravvive con attività cittadine ma si adegua al sito su cui le sue prime strade sono state tracciate assumendo una forma simile a quella di una città antica. Non a caso alcune strutture (soprattutto nel settore III)¹⁴⁸ richiamano la tipologia della *casa a corte*¹⁴⁹, soluzione che permette la convivenza di esseri umani e animali, con un nucleo abitativo chiuso e un settore aperto al centro o sul retro.

4.2. Dalla documentazione 2D ai dati 3D alla modellazione con Blender: la *pipeline*

La resa tridimensionale “fotografa” quindi gli edifici a carattere residenziale e produttivo dei settori I e III nel loro assetto di età comunale, che resta quasi del tutto intatto.

Le *range maps* ottenute dalle scansioni allineate e pulite sono state trasformate in una superficie unica, con il *Poisson*¹⁵⁰, un filtro di MeshLab che ha il fine di ricostruire la superficie ottimizzando la *mesh* e consente un'ottima conservazione dei dettagli geometrici. Una volta ottenuta una

146 Leopoli-Cencelle II 1996, p. 8.

147 Analogie sono riscontrate in epoca medievale, in città anglosassoni nate da un originario assetto romano (York, Winchester) (Guidoni, 1991)

148 Bougard, Cirelli, Lecouyer 1996

149 Chapelot, Fossier, 1985

150 Cfr. par. 2.3.1

superficie chiusa si è passati a un'ulteriore “pulizia” manuale per ridurre il naturale “rumore” ed eliminare le parti catturate dallo scanner al di fuori dall'area di acquisizione.

Dove la geometria era mancante, oppure per questioni legate al terreno impervio o a luoghi difficilmente raggiungibili, come ad esempio l'ambiente B -il granaio- del Settore III, si è pensato di integrare i risultati di MeshLab con quelli in *Computer Vision* e utilizzare la funzione di allineamento manuale per sovrapporre il prodotto di due strumenti software differenti. I modelli sono stati importati da PhotoScan in MeshLab insieme alle *mesh* da *laser scanner* utilizzando il *Point Based Aligning* già illustrato (Fig. 35) per allineare le due *mesh*.

Per la fase di modellazione 3D si è scelto Blender¹⁵¹, un *tool* di modellazione 3D *open source* in continua evoluzione grazie a una cospicua *community* di utenti. Blender è uno strumento per modellazione 3D, animazione e *rendering* che permette di realizzare modelli complessi in 3D.

Per costruire i modelli si è tenuto conto di alcuni punti fondamentali:

- Finalità del modello¹⁵²
- Visualizzazione dei dati utilizzati per le ipotesi di visualizzazione
- Possibilità di “decostruire” e analizzare ogni singola componente del modello
- Possibilità di scenari alternativi

La *pipeline* - la pianificazione del lavoro – e il metodo scientifico sono stati così articolati:

- Definizione delle domande di ricerca¹⁵³

151 “Blender is the free open source 3D content creation suite, available for all major operating systems under the GNU General Public License”. www.Blender.org

152 Hermon, Nikondem 2007

153 Hermon 2008

- Analisi dei dati di scavo, raccolta di informazioni e risorse

Pubblicazioni, piante, schede US e appunti di chi è entrato a contatto diretto con gli ambienti sono stati studiati a fondo prima di elaborare ipotesi. Nel confronto con edifici analoghi tuttora in uso, la totale assenza di documenti relativi all'accatastamento delle aree edificabili e di eventuali fonti permette solo di avanzare delle ipotesi basandosi sulle altre realtà italiane similari analizzate precedentemente. Per la rielaborazione della relazione degli edifici con la strada, dello sviluppo verticale delle costruzioni, della forma di accessi e aperture sono stati presi come riferimento edifici analoghi ancora in uso nei comuni della Tuscia¹⁵⁴, mentre per l'analisi delle tipologie sono stati utili i confronti con numerose realtà italiane, in particolare - e nonostante la distanza - le analogie più significative si sono riscontrate con Milano¹⁵⁵.

- Formulazione di ipotesi e interpretazione dei dati

Là dove non sono presenti evidenze, per conoscere quale fosse l'altezza degli alzati ci si è basati prima di tutto sull'analisi dello spessore dei muri superstiti, per trarre conclusioni sul peso e sulla mole delle strutture che avrebbero dovuto sostenere¹⁵⁶. Per quanto riguarda i piani intermedi invece, si dispone di dati certi almeno per il settore III, dove un ambiente in particolare ha mantenuto nelle pareti le tracce dell'incasso delle travi che reggevano i solai. Non è dato sapere se vi fosse un terzo livello, ma considerato lo spessore dei muri sembra un'ipotesi poco plausibile. Per la

154 Nell'edilizia comune sono attestate tipologie riscontrabili nelle aree limitrofe, ma anche nel resto d'Italia. I confronti plausibili sono con Viterbo o Tarquinia o altri comuni della Tuscia caratterizzati in molti casi da profferlo (o cimasa- con la funzione di separare i due ingressi all'abitazione). A Vetralla in contesti di X-XI secolo si rinvennero particelle con planimetria trapezoidale, indice di un'origine medievale. Ivi una via lunga ed una corta che tendono a convergere verso la cinta muraria (Cesarini 2001). Qui le aperture di ingresso ai piani superiore e inferiore sono coronate da archi a tutto sesto (talvolta l'accesso al piano seminterrato è costituito da un'apertura di dimensioni minori sormontata da un arco a sesto ribassato) ma a Cencelle sono stati rinvenuti pochissimi concetti con una lavorazione in bugnato.

155 In un confronto con le case a schiera ritrovate a Milano negli scavi di piazza Duomo è possibile risalire alla stessa tipologia di Cencelle: lotti di forma quadrangolare stretti e lunghi che tendono ad assumere una forma trapezoidale (MM3).

156 Giuliani 1990

resa delle coperture e di alcune suppellettili ci si è basati sui materiali di scavo e, dove questi erano assenti o inevitabilmente consunti dal tempo (ad esempio le strutture in legno), si è tentato di reinventarli in forma di materiali deperibili. Gli spazi mattonati sono stati considerati come aree aperte (nelle precedenti ipotesi nonostante la similitudine fra vari spazi mattonati, alcuni erano stati considerati aperti, altri all'interno di abitazioni). Le coperture si sono ipotizzate tutte a un solo spiovente poiché in fase di scavo non sono mai stati rinvenuti coppi di colmo.

- Modellazione in 3D degli edifici e successiva "texturizzazione"¹⁵⁷

Il processo di modellazione ha avuto luogo partendo dagli strati più bassi e visibili e procedendo verso l'alto, analizzando le murature fino a cercare di modellare il loro aspetto di età comunale: una sorta di processo stratigrafico a ritroso, quindi. Una volta realizzata la pianta rettificata omogeneizzando le caratterizzazioni della grafica di scavo per ottenere dei muri perimetrali il più possibile geometrici, si sono attribuite delle quote verosimili alle strutture e alle suppellettili superstiti per poter infine "estrudere"¹⁵⁸, creare cioè gli alzati dalla pianta proiettandoli fino alla quota desiderata. La pianta degli edifici si basa sulle proporzioni reali, ma per quanto riguarda le altezze, le suppellettili, le aperture non è metrica, anche se si è cercato tramite i confronti e un'attenta riflessione sui fini e sulle funzioni degli oggetti e delle strutture, di mantenere delle proporzioni verosimili. Successivamente sono state inserite aperture, coperture e solai ed infine si è passati alla "texturizzazione" dei modelli. A questo scopo è stata programmata una campagna fotografica per l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione, scattate in maniera "strategica", cercando

157 "In CGI, texture mapping is a method to add detail to surfaces by projecting images and patterns onto those surfaces. The projected images and patterns can be set to affect not only color, but also specularity, reflection, transparency, and even fake 3-dimensional depth. Most often, the images and patterns are projected during render time, but texture mapping is also used to sculpt, paint and deform objects" <http://wiki.Blender.org/index.php/Doc:2.6/Manual/Textures>.

158 " "Extrude" command (EKEY). This command allows you to create cubes from rectangles and cylinders from circles" <http://Blender.active-domains.com/x/x2215.html>.

la giusta illuminazione e la giusta angolazione e quanto più possibile frontali, soprattutto nel caso delle murature, per poter rendere più agevole la mappatura dei modelli tridimensionali. La “texturizzazione” è avvenuta quindi utilizzando immagini realistiche realizzate dalle foto acquisite in loco e trattate con Gimp¹⁵⁹, un software *open source* per l’elaborazione di immagini, disponibile gratuitamente. Nella fase finale si è cercato di rendere quanto più realistiche le strutture utilizzando una “texturizzazione” che privilegiasse l’aspetto filologico e fosse allo stesso tempo il più possibile realistica. Quanto ai livelli di affidabilità dei modelli, l’aspetto delle murature naturalmente non è attendibile, anche se le *texture*, come già accennato, sono ricavate da immagini acquisite in loco. Solo in alcuni casi, come per le vaschette dell’ambiente 1 (Figg. 52, 53), la vasca circolare dell’ambiente 2 (Fig. 62) e l’apertura nel muro relativo a un sistema idraulico (Figg. 53, 54) la “texturizzazione” è stata utilizzata mappando esattamente l’oggetto sull’immagine acquisita sullo scavo.

- “Ripensamenti” in corso d’opera.

Nel corso del lavoro di modellazione è stato inevitabile riflettere su alcune ipotesi formulate in fase di pianificazione. In alcuni casi, davanti al modello tridimensionale ci si è accorti che alcune ipotesi elaborate in fase di scavo non potevano essere plausibili per motivi statici, per caratteristiche simili in altri ambienti interpretate diversamente, per i materiali o per il rapporto fra le strutture. Da qui la riflessione sull’utilità di combinare lo scavo e i relativi dati “a due dimensioni” con modelli tridimensionali (meglio se contemporaneamente allo scavo) che possano contribuire al “*brainstorming*” sull’aspetto che doveva avere ciò che si è scavato.

- Visualizzazione

159 “GIMP is the GNU Image Manipulation Program. It is a freely distributed piece of software for such tasks as photo retouching, image composition and image authoring. It works on many operating systems, in many languages” www.gimp.org.

Per mostrare la situazione attuale degli edifici confrontata ai modelli, si è scelto di mettere a confronto nei riferimenti fotografici l'immagine scattata in loco, con il prodotto del *rendering*¹⁶⁰ (realizzato con il motore interno a Blender, che attraverso una o più camere all'interno del "world" - lo spazio di lavoro - permette di creare foto realistiche o video degli oggetti modellati) proponendo l'oggetto "renderizzato" dalla stessa angolazione dell'acquisizione fotografica.

- Comparazione con le acquisizioni 3D

La geometria tridimensionale creata in Blender è stata infine importata in MeshLab. L'interfaccia del software permette di organizzare la geometria in livelli, nei quali la visualizzazione di una determinata caratteristica può essere "accesa" o "spenta" (come nei principali programmi di grafica). Dunque l'interfaccia di MeshLab può essere usata anche per mostrare i modelli 3D al pubblico in modo da rendere aperti i dati e illustrare come viene investigato e interpretato un contesto archeologico.

4.3. *Modelling space and time as room of possibilities: paralleli fra teorie derivate da dati di scavo e da una restituzione filologica tridimensionale*

La modellazione tridimensionale di Cencelle si è svolta in più fasi e nel corso di un lungo periodo, durante il quale si è sperimentato e cercato il metodo più adatto a rendere filologicamente l'aspetto dei lotti. Le strutture superstiti sono state analizzate con l'ausilio dei dati ricavati dalle precedenti campagne di scavo¹⁶¹, ma sono stati presi in considerazione anche il rapporto con gli elementi circostanti, la situazione topografica e la posizione all'interno del sito. Il risultato finale implementabile, modificabile e "de-strutturabile", anche grazie alla scelta dei software, rende l'idea dell'assetto delle strutture, delle differenti tipologie di coperture e delle

¹⁶⁰ "Rendering is the final process of CG (short of post processing, of course) and is the phase in which a 2D image corresponding to your 3D scene is finally created".
<http://wiki.Blender.org/index.php/Doc:2.6/Manual/Render>.

¹⁶¹ Martorelli *et al.* 1996; Bougard, Cirelli, Lecouyer 1996

connessioni fra gli ambienti, senza tralasciare il loro rapporto con la strada che incide notevolmente sulle differenze di quota. Nei paragrafi che seguono si propongono i modelli tridimensionali elaborati con Blender rapportati alle acquisizioni da *laser scanner* e, dove disponibile, si compara con il dato 2D cartaceo relativo alla prima documentazione di scavo.

4.3.1. Il settore I: ambienti e ipotesi

Il Settore I (Fig. 51) è localizzato all'interno dello spazio compreso nella biforcazione dell'asse stradale principale che dalla porta orientale conduce alla sommità della collina (Fig. 50). Le due strade sono lastricate in blocchi di trachite. Una segue l'andamento della cerchia delle mura, l'altra, salendo, si adatta alla pendenza naturale del terreno con due gradini (che le danno la connotazione di *via gradata*) (Fig. 9). Comprende tre ambienti di edilizia residenziale oltre che una torre e una casa-torre confinanti con questi sul lato Ovest. Il materiale prevalente nelle costruzioni è trachite in grossi blocchi, con sporadici conci di reimpiego in tufo, tutti disposti in filari piuttosto regolari¹⁶².



Fig. 51. Il settore I modellato filologicamente con Blender

• AMBIENTE 1

162 Martorelli *et al.* 1996

L'ambiente 1 (Fig. 52) aveva probabilmente lo stesso proprietario dell'ambiente 2 almeno nell'ultima fase; ipotesi attestata dalla presenza di



Fig. 52. Il piano terreno dell'ambiente 1 con le due vaschette quadrangolari

un sistema idraulico passante attraverso il muro che li mette in comunicazione (Fig. 53).



Fig. 53. Il sistema idraulico passante fra l'ambiente 1 e l'ambiente 2 (immagine e modello)

È costituito da un'officina al piano terreno, dati i confronti e la presenza di due vaschette in trachite al suo interno (Figg. 52, 53). È situata a una quota più bassa rispetto a quella del piano stradale e vi si accede scendendo due gradini. Lo spazio è diviso da un setto che crea due ambienti (Nord, verso la strada e Sud, il retrobottega) con un'apertura che consente il passaggio da un ambiente all'altro. Presumibilmente la stanza a sud poteva essere un magazzino o un deposito, mentre le attività artigianali si svolgevano evidentemente nella zona nord. Il pavimento

poteva essere coperto da assi di legno, forse trattato con argilla per isolarlo dalle fiamme dei focolari ritrovati e quindi ridurre il rischio di incendi, anche se non è escluso che, sfruttando gli avvallamenti naturali per i fuochi, fosse in semplice terreno battuto e che le altre numerose depressioni fossero state colmate con della terra. All'interno, a lato dell'ingresso, una scala mette la bottega in comunicazione con il piano superiore, a cui si accede anche dalla strada, tramite un piccolo "profferlo"¹⁶³, ipotizzato anche per giustificare la pavimentazione mancante sulla strada (Fig. 54).



Fig. 54. Il lotto che segue la *via gradata* e il piccolo "profferlo" che avrebbe dovuto dare accesso al piano superiore dell'ambiente 1

Di conseguenza la parte Nord dell'ambiente, quella prospiciente la strada, è stata ipotizzata a due piani, mentre il retro a un solo piano, con una copertura fittile, testimoniata dal ritrovamento di un crollo di tegole in loco. All'interno, sotto la scala che mette in comunicazione i due piani, l'attaccatura di una piccola volta a botte testimonia la presenza di un piccolo sottoscala (Fig. 55), presente anche nell'ambiente 3 e, con funzioni diverse, in due delle case del settore III.

¹⁶³ Cfr. Nota 154



Fig. 55. Il sottoscala nell'ambiente 1

Il piano superiore era probabilmente costituito da un ambiente unico illuminato da un'unica finestra in facciata, ipotesi attestata da confronti con realtà analoghe e con il modulo base delle case a schiera di età medievale¹⁶⁴. Il sistema idraulico che accomuna l'ambiente 1 all'ambiente 2, con il foro nel muro a Est, ricavato in un blocchetto di materiale lapideo e perfettamente conservato (Fig. 53) ha una funzione chiara, ma allo stesso tempo lascia spazio a più interpretazioni. Se si vuole legare la sua funzione alla lavorazione del metallo, allora si potrebbe pensare che la vaschetta di forma ovale nell'ambiente 2 (Fig. 56) (inspiegabilmente irregolare¹⁶⁵, con un'apertura su un lato e due fori alle estremità più alte) potesse servire come una sorta di recipiente adatto a versare la materia prima che, attraverso un sistema di canalizzazione, passava nel settore I. Probabilmente nel foro presente nel muro erano inserite delle tegole, data la forma semi-circolare della base dell'apertura. Il concio inoltre presenta una scanalatura: forse l'apertura poteva essere aperta o chiusa a piacimento con una lastra di metallo che scorreva in quella sorta di

¹⁶⁴ Sagina, 1996

¹⁶⁵ La vaschetta ha una forma ovoidale, come se fosse fatta per versare un liquido, circostanza che sembra essere non casuale, dal momento che un'altra vaschetta nel settore III ha forma perfettamente circolare. Perché dunque realizzare una vaschetta irregolare se è più semplice crearne una perfettamente circolare?

binario¹⁶⁶. La presenza di due vaschette squadrate di dimensioni diverse (Figg. 52, 53) potrebbe far pensare al seguito del processo di lavorazione dei metalli. L'assenza di una delle facce della vaschetta più grande, attualmente rovesciata, potrebbe non essere frutto di una rottura, dal momento che la sezione è abbastanza regolare, ma forse una sorta di scivolo per la materia prima, mentre la vaschetta più piccola potrebbe aver avuto funzione di vasca di raffreddamento. L'ipotesi appena illustrata non esclude che le vasche e l'apertura nel muro potessero però essere funzionali a un semplice sistema per la raccolta dell'acqua piovana, che troverebbe conferma anche nella presenza della canaletta di scolo intonacata addossata al lato ovest dell'ambiente 2, proprio sotto al foro che comunica con l'ambiente 1 (Fig. 56).



Fig. 56. La vaschetta di forma circolare irregolare nell'ambiente 2

• AMBIENTE 2

L'ambiente 2 (Fig. 57) si distingue dagli altri per la presenza di una pavimentazione in blocchi di trachite. Per questo motivo è stato dunque considerato uno spazio aperto. Della vaschetta (Fig. 56) ritrovata in

¹⁶⁶ Un concio lavorato esattamente allo stesso modo è presente nel settore VIII, il quartiere di rappresentanza di Cencelle

prossimità dell'apertura e conseguentemente spostata si è già parlato. La si può ipotizzare rialzata, con un sistema che permettesse di piegarla e versarne il contenuto oppure, nel caso avesse solo funzione di ricevere l'acqua piovana, poteva essere appoggiata al bordo della canaletta di scolo che avrebbe raccolto anche l'acqua che debordava dalla vasca. La presenza di buche nel piano pavimentale, con lo stesso materiale litico che si dispone in maniera concentrica rispetto al foro, potrebbe essere la prova della presenza di pali posti a sostegno di una tettoia che copriva l'area sud-est dell'ambiente e poteva servire forse da ricovero per gli animali, mentre la parte scoperta, una sorta di aia, era adibita alle attività dell'officina che necessitavano di uno spazio all'aperto.



Fig. 57. L'ambiente 2 del settore I, mattonato quindi considerato aperto. Immagine e modello

• AMBIENTE 3

Dell'ambiente 3 (Fig. 58) sono visibili sia la scala che permetteva l'accesso dalla strada al piano superiore, sia i resti della scala all'interno. I due ingressi (presenti d'altronde anche nell'ambiente 1) indicano che il piano terreno e quello superiore non erano divisi tra due diversi proprietari (come attestato in altri contesti analoghi¹⁶⁷). Analizzando la pendenza della scala, rapportata alla differenza di quota naturale, si conclude che le due scalette portano allo stesso pianerottolo e, come nell'ambiente 1, costituiscono due ingressi indipendenti per la stessa

¹⁶⁷ Marcelli-Santoni 2001

abitazione con funzione di accesso dall'esterno al piano superiore senza passare per il pianterreno e da questo all'abitazione senza uscire in strada.



Fig. 58. L'ambiente 3 come appare e il modello con la tettoia che avrebbe potuto ripararne l'accesso

La scala interna è evidentemente molto stretta e ripida e la sua struttura scarica il peso lateralmente su una piccola volta a botte (Fig. 55) sulla quale la scala è impostata. Come nell'ambiente 1, la zona sotto la voltina a botte poteva verosimilmente essere un deposito di merci o di derrate, forse chiusa da un infisso di legno. Il crollo di tegole circoscritto davanti all'ingresso dell'abitazione e i resti marciti di travi lignee che potevano sostenere una tettoia posta a protezione dell'ingresso (Fig. 58) attestano la destinazione d'uso a bottega del piano inferiore, con uno spazio coperto all'esterno adibito alla vendita. Non esistono invece tracce o elementi che possano lasciare immaginare come fosse organizzato il piano superiore quanto a suddivisione e suppellettili.

4.3.1.1. Comparazione da 3D: la questione delle vaschette

Il numero consistente di vaschette presenti nello scavo e la forma singolare di alcune di queste hanno dato vita a un dibattito sul campo che ha suggerito a chi scrive di sperimentare una forma di comparazione 3D di queste suppellettili, poco mobili considerati il peso e le dimensioni. Si è proceduto quindi ad acquisire in *Computer Vision* parte delle vaschette

presenti negli ambienti artigianali con l'intento di creare una sorta di database che permettesse di confrontarne forme e misure per poi giungere a conclusioni sulla posizione originaria e sulla funzione. Con una media di circa 20 scatti per oggetto si è realizzato per ognuna un modello 3D in PhotoScan. I modelli sono stati esportati poi in formato .PLY in MeshLab dove sono stati scalati alle misure reali servendosi di una misura certa (uno spigolo regolare, ad esempio) effettuata in fase di acquisizione. All'interno del programma, numerosi filtri permettono di visualizzare caratteristiche diverse dell'oggetto. Per l'esperimento riportato si è utilizzata la funzione di *render "X-ray"* che, in una visualizzazione che simula la vista ai raggi X, ha permesso di definire il tipo di lavorazione e soprattutto lo spessore delle vaschette, oltre che la forma (il fatto che sullo scavo molte delle vaschette si trovino addossate ai muri non consente di fare misurazioni del genere *in situ*). La posizione della prima vaschetta (Fig. 59) (posta sotto all'apertura che collega ambiente 1 e ambiente 2) e la sua forma lasciano pensare che non si sia rotta in seguito a usura, ma che forse le sia stata data volutamente quella forma, probabilmente in una fase di riuso, come si nota dal taglio su uno dei lati che appare piuttosto netto. Resta da comprenderne la funzione, anche alla luce del suo spessore ridotto rispetto alla seconda vaschetta (Fig. 60) (forse non *in situ*, rinvenuta nello stesso ambiente) che appare molto meno capiente ma molto più spessa. È spaccata in due, ma chiaramente in questo caso si tratta di una lesione non volontaria. Questo rafforza l'idea che la spaccatura sulla prima vaschetta, analizzata in precedenza, possa essere legata alla sua funzione, forse di scorrimento dell'acqua proveniente dal condotto soprastante.

Passando dal settore I al settore II (a vocazione prevalentemente artigianale) c'è stata la possibilità di un altro confronto. La vaschetta ancora *in situ* (Fig. 61) in uno degli ambienti presenta caratteristiche simili a quella nel settore I, con una particolarità: ha uno dei lati stondato, per

poterla inclinare, e una visibile pendenza sul fondo, evidentemente per poter versare liquidi.

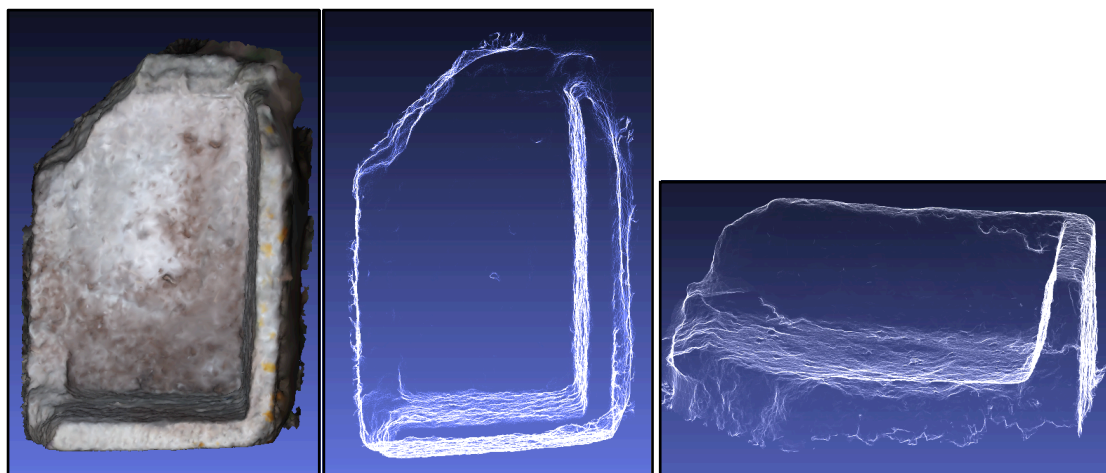


Fig. 59. La vaschetta *in situ* nell'ambiente 1 visualizzata con MeshLab

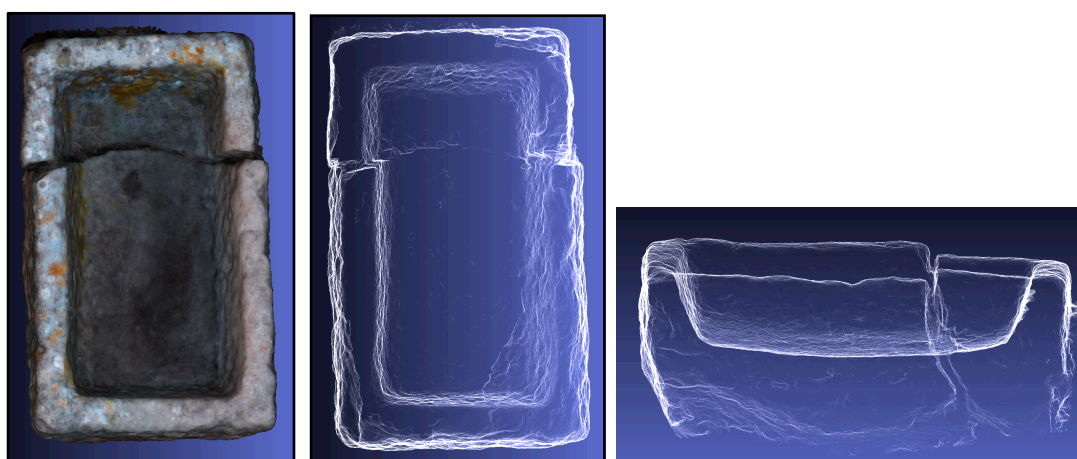


Fig. 60. La seconda vaschetta quadrangolare dell'ambiente 1 visualizzata in MeshLab

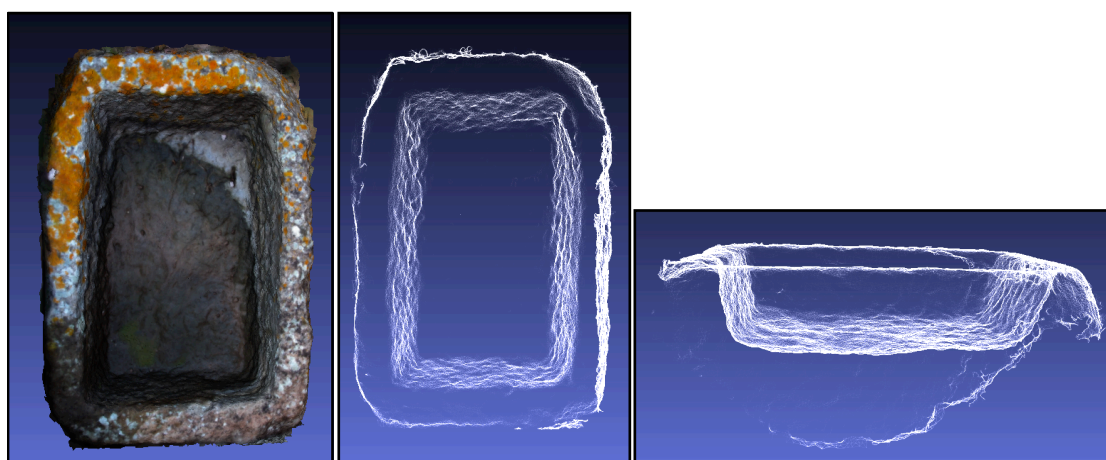


Fig. 61. La vaschetta quadrangolare presente nel settore II visualizzata in MeshLab

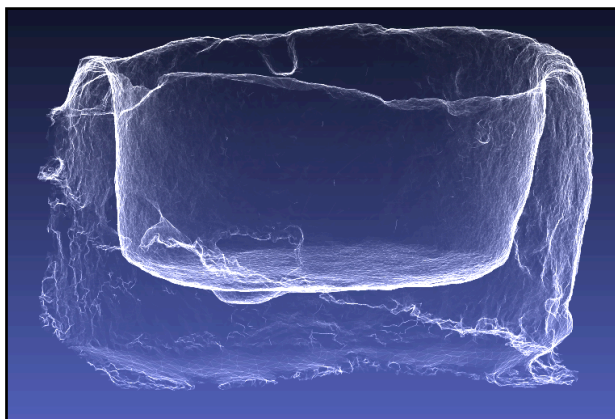
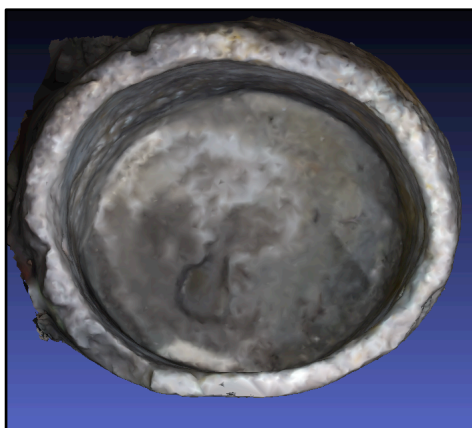


Fig. 62. La vaschetta tonda del settore I visualizzata in MeshLab

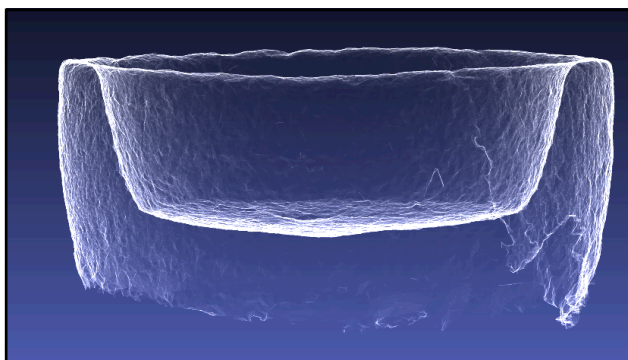


Fig. 63. La vaschetta tonda del settore III visualizzata in MeshLab

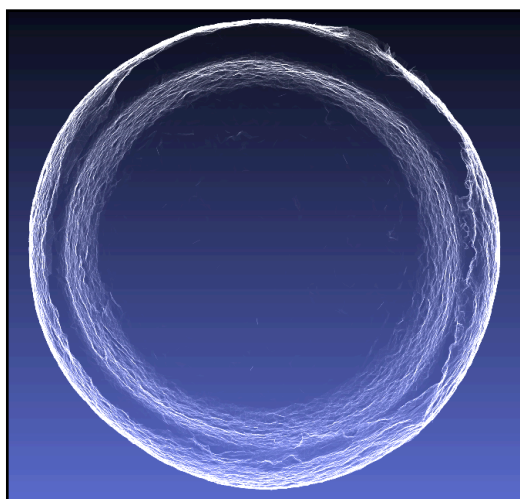
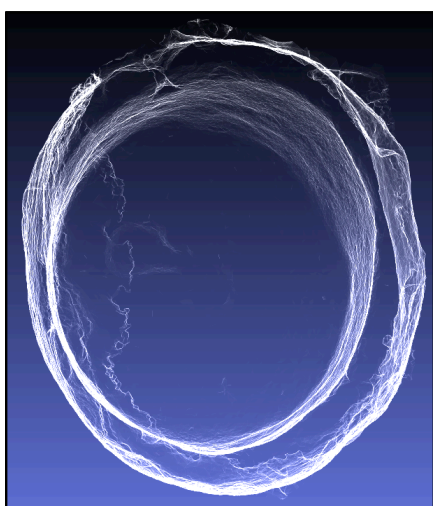


Fig. 64. La vaschetta irregolare del settore I comparata alla vaschetta circolare del settore III

Una seconda comparazione è stata fatta tra le vaschette tonde (una nel settore I e l'altra nel settore III) apparentemente simili anche se in realtà una ha forma ovale, mentre l'altra è perfettamente circolare.

Da una prima analisi e dall'uso di uno dei numerosi filtri di MeshLab emerge chiaramente la netta differenza nella forma delle due vaschette. Da ciò si deduce che l'irregolarità della prima non è dovuta a imperizia di chi l'ha realizzata. La forma, quelle che sembrano rotture (ma probabilmente hanno forme e funzioni precise) e la stessa traccia incavata sul fondo sono forse legate al suo utilizzo sul quale si farà luce grazie ad analisi mirate.

Un esperimento del genere evidenzia le infinite possibilità offerte dall'interpretazione da 3D, che può spaziare dall'edificio più grande al manufatto più piccolo, amplificando la mole di dati ma semplificandoli e rendendoli più leggibili allo stesso tempo.

4.3.2. Il Settore III

Il Settore III dello scavo di Cencelle (Figg. 50, 65) è la zona più periferica, situata a Nord-Ovest, nell'area più prossima alla Porta Est (l'accesso principale alla città) e occupa circa 190 m².



Fig. 65. Il settore III di Leopoli-Cencelle modellato in Blender

È stato scavato dall'*École Française de Rome* in due fasi, dal 1994 al 1999¹⁶⁸. Il complesso è costituito da 11 ambienti¹⁶⁹ a vocazione sia residenziale sia artigianale e si presenta come uno degli esempi più ricchi e variegati di edilizia abitativa medievale. Sviluppa infatti il modulo rigidamente organizzato delle case a schiera e quello più "sociale", che si racchiude attorno a uno spazio aperto delle case a corte. Qui, più famiglie condividono gli stessi spazi e case con proprietari diversi hanno alcuni muri in comune. Restano incerti alcuni dati cronologici, legati soprattutto alle preesistenze, ma la presenza di cisterne, vasche, resti di suppellettili cadute in seguito a un incendio, fanno di questo settore un quartiere vivo e produttivo, nonostante la sua posizione per un verso più periferica, per un altro perfettamente connessa con i due assi stradali fondamentali e soprattutto con la porta principale della città. Tale collocazione, facile da raggiungere, connessa alla rete stradale interna e esterna, vicina alla porta d'accesso alla città, lascia pensare che l'area fosse strategicamente collegata con l'esterno, per l'esportazione e il commercio dei manufatti (quasi sicuramente oggetti metallici) prodotti *in situ*. La cronologia di strutture e materiali è tarda e limitata (prevalentemente XIV secolo). Gli edifici dell'isolato presentano particolarità costruttive finalizzate al deflusso delle acque, alla circolazione dell'aria e a mantenere indipendenti, anche giuridicamente, i vari ambienti. Il fattore che differenzia questi ambienti dagli altri settori scavati, ascrivibili a una fase più tarda, è la presenza di sistemi di canalizzazione delle acque piovane, che lascia pensare a una programmazione della lottizzazione e a differenti proprietari dei vari lotti: le canalette fra un'abitazione e l'altra servivano anche a dividere le proprietà: un caso identico si trova nei lotti a schiera presso Poggibonsi¹⁷⁰. Come nel Settore I, si è di fronte ad una

168 Bougard, Cirelli, Lecouyer 1996

169 Nel corso delle prime campagne di scavo sono stati individuati cinque ambienti, in seguito ne sono stati scavati altri sei che formano, con varie funzioni, la parte principale di un isolato urbano.

170 Francovich, Tronti, Valenti 2004

lottizzazione che prevede gli ambienti relativi alle attività artigianali al piano terra e quelli abitativi al piano superiore, in un contesto in cui case a schiera (lotti dalla forma più vicina al quadrato, non più allungati perpendicolarmente rispetto all'asse stradale, quindi forse più tardi¹⁷¹) sviluppano ambienti lateralmente e sul retro e assumono la forma delle case a corte. Un elemento comune con altri settori di Cencelle è il fatto che venga intaccato il banco di trachite per disporre le fondazioni e che in seguito, nell'ultima fase, venga usata terra di riporto per superare i dislivelli dovuti alla pendenza.

- GLI AMBIENTI A, B, D (Fig. 82, in blu)

Il primo ambiente che si incontra arrivando da Sud è l'ambiente D, interpretato come spazio aperto (Fig. 66). È connesso all'ambiente B (il cosiddetto "granaio") e si apre sulla via che fronteggiando la Porta di Leone sale verso il settore I.



Fig. 66. L'ambiente D del settore III, immagine e modello

A chiudere l'accesso, forse un cancello di legno alloggiato in un blocco di trachite che sporge sulla strada, in cui è rimasta una traccia circolare (Fig. 67).

171 Bougard, Cirelli, Lecouyer 1996



Fig. 67. Il blocco di trachite, forse l'alloggiamento di un meccanismo di chiusura

L'ambiente D si può definire uno spazio di passaggio. Ha un'area mattonata che occupa la zona dell'ingresso e nella parte Ovest, sul fondo sembra sfruttare il banco di trachite, tagliato a mo' di scala, per accedere al "granaio". Si è ipotizzato inoltre un muro di cinta alto poco più di 2 metri, simile a quello dell'ambiente 2 nel settore I (Fig. 57).

Il centro di quest'area, se non di tutto il settore, è il singolare Ambiente B, il cosiddetto "granaio" (Fig. 68).



Fig. 68. L'Ambiente B, identificato come "granaio"; immagine e modello

A dispetto delle sue dimensioni ridotte, le sue interpretazioni sono disparate. Si tratta di un ambiente a pianta rettangolare connesso a D e A. Sul lato Sud, quello in comune con A, ha un blocco di trachite che potrebbe essere stato utilizzato, come per A, con la funzione di scaletta per passare da un ambiente all'altro.

La quota della cresta del muro è la stessa del pavimento di A, quindi si potrebbe ipotizzare una copertura di legno e un accesso anche da A (Fig. 69). Sul lato corto Nord, si trova una struttura composta da conci posti in forma di arco¹⁷² (Fig. 68). L'ambiente B e la casa E furono provvisti di "pozzetti di raccolta" costruiti nello spessore dei muri affacciati sul vicolo comune; erano rispettivamente alimentati da una colonna verticale e accessibili tramite aperture (ancora visibili) praticate sul lato interno dei muri. Questi sembrano comunicare sia con l'arco sia con la tracerna che separa i due ambienti e lasciano pensare che si potesse trattare di un impianto creato per portare aria calda ai piani superiori.

L'ambiente A (Fig. 69) anch'esso in parte mattonato, è stato considerato uno spazio aperto, una vera e propria corte con uno spazio coperto per il ricovero degli animali, ipotizzato nell'area in cui il pavimento è mancante.

172 Destano particolare interesse i confronti possibili fra il granaio e alcune strutture analoghe rinvenute a Milano, dove un ambiente analogo, di dimensioni maggiori, ma con pianta simile e apertura ad arco, si ritrova anche nelle case a schiera venute alla luce nello scavo in piazza Duomo, ma in questo caso si trattava di una nevia, ipotesi improbabile per Cencelle, considerata la differenza di clima. (Andrews, 1991). Altri esempi si ritrovano in Francia e in Nord Europa, passando attraverso quelli più prossimi di Priverno (De Minicis, 2001). Tali confronti potrebbero legare Cencelle ai moduli dell'edilizia cistercense, senza escludere nella città presenza di maestranze Nordeuropee.



Fig. 69. Il modello dell'Ambiente A, provvisto di un'area mattonata, quindi interpretato come uno spazio in parte aperto. La parte coperta da assi lignei è B, il cosiddetto "granaio"

La copertura poteva essere di legno, ma anche in materiale fittile, dal momento che sono stati trovati crolli di tegole *in situ*. Vi si accedeva da Sud, forse attraverso un cancello di legno, come per D. La quota più elevata dell'ambiente A lascia pensare che desse accesso anche al "granaio" B, sfruttando anch'esso la botola e gli assi di legno che lo coprivano.

- GLI AMBIENTI E, F (Fig. 82, in verde)

L'ambiente E (Fig. 70) -interpretato come abitazione- conserva tutte le caratteristiche dei lotti a schiera, con il modulo e la metratura tipici¹⁷³. All'ingresso, che si affaccia sulla via principale, è stato ipotizzato una sorta di disimpegno, coperto da una tettoia di legno. Il retro dell'ambiente al piano terra, dava accesso, tramite alcuni gradini ancora visibili (e forse una botola) al "granaio" B. È molto probabile che l'ambiente avesse un piano superiore, con un'unica stanza di dimensioni ridotte, illuminata da un'unica apertura in facciata. Sarebbe ipotizzabile un piano superiore, con l'accesso che poteva avvenire dal piano stradale, per mezzo di una scala in legno con un ballatoio di cui però non resta traccia.

¹⁷³ Sagina, 1996



Fig. 70. L'ambiente E interpretato come abitazione con caratteristiche delle case a schiera

La casa F (Fig. 71) aveva caratteristiche molto simili all'ambiente E, ma su una scala maggiore. Da qui l'interpretazione di entrambi gli edifici come lotti abitativi.



Fig. 71. La casa F e l'ambiente a lato dell'ingresso, interpretato come deposito coperto

Costituita anch'essa da un unico ambiente, la casa F è caratterizzata sulla facciata prospiciente la via principale, da una sorta di disimpegno, uno spazio molto angusto a sinistra dell'ingresso, che scende di quota attraverso due gradini svolgendo la funzione di piccolo deposito coperto da una tettoia. L'ingresso al piano terra, invece, è leggermente rialzato rispetto alla strada.

- GLI AMBIENTI C e H (Fig. 82, in arancio)

Rivolti verso la Porta di Papa Leone, gli ambienti C e H (Fig. 72) costituivano un unico edificio suddiviso in due aree.



Fig. 72. Modello degli ambienti C e H; visibile l'apertura che li rende comunicanti

Confinano con lo spazio aperto D ma non hanno connessioni con questo, elemento sottolineato dalla presenza della tracerna¹⁷⁴ che li separa (Fig. 73). I due ambienti erano divisi da un setto murario e probabilmente comunicavano tramite un'apertura ad arco nel muro divisorio (Fig. 72). Gli accessi dalla strada sono uno di dimensioni inferiori (C) l'altro più ampio (H) e sembrano distinguere i due diversi usi, forse rispettivamente

174 De Minicis, 2001

deposito di stoccaggio e area per la lavorazione dei manufatti, dunque un'officina.



Fig. 73. Gli ambienti C e H e il loro rapporto con gli altri ambienti del settore III (vista da Sud-Est); visibile la “tracerna” che li separa dall’ambiente D, modello

Per i due ambienti si è ipotizzata un'unica copertura forse a un solo spiovente, dato lo spessore notevole dei muri e un unico piano, per la probabile presenza di fiamme libere.

- GLI AMBIENTI R e P (Fig. 82, in viola)

Seguendo un modulo differente da quello degli altri ambienti, R e P occupano un'area più ampia e si sviluppano parallelamente (e non perpendicolarmente come gli altri) rispetto alla strada principale. L'accesso avviene attraverso l'ambiente R, tramite tre aperture, una a Est più ampia e due a Ovest che portano rispettivamente sul piano terreno e a quello superiore (Fig. 74). La quota del primo, come in gran parte degli edifici di Cencelle, è ribassata rispetto al piano stradale e vi si accede scendendo due gradini. L'ambiente R è suddiviso in due stanze, comunicanti attraverso un'apertura ad arco nel setto murario.



Fig. 74. L'accesso agli ambienti R e P che si sviluppano parallelamente alla strada, modello

Entrambe le stanze hanno sul fondo un'ulteriore apertura che conduce verso l'ambiente P (Fig. 75) interpretato come aperto per la presenza di un'area mattonata (Fig. 76). Un bancone in muratura si trova addossato al muro Ovest, mentre la vaschetta circolare regolare in trachite, che attualmente si trova accanto all'ingresso di R, poteva verosimilmente trovarsi nella corte P (Fig. 77).



Fig. 75. Il bancone in muratura a ridosso del muro Ovest su un'area mattonata dell'ambiente P

Nella restituzione tridimensionale l'area che permetteva il passaggio da R alla corte P è stata coperta da una tettoia, mentre l'area mattonata è stata lasciata scoperta (Fig. 76) ma nulla esclude che potesse avere anch'essa una copertura.



Fig. 76. Modello dell'ambiente P, mattonato, quindi interpretato come una corte aperta



Fig. 77. Modello dell'ambiente P, particolare della vaschetta (ora all'interno di R) e del bancone in muratura addossato al muro Ovest

La scala che conduceva al piano superiore era impostata su una piccola volta a botte, di cui rimane l'attaccatura intonacata, come già visto nel

settore I (Fig. 55). Non è chiaro se il piano superiore di R fosse suddiviso o meno in due stanze. In ogni caso, data l'ampiezza dell'ambiente, si sono ipotizzate due piccole finestre in facciata.

- GLI AMBIENTI S e T (Fig. 82, in giallo)

Gli ambienti S e T, al limite Nord-Ovest del settore, si possono definire esattamente simmetrici. Erano provvisti di un piano superiore e entrambi rispettano il modulo tipicamente rettangolare delle case a schiera. L'ambiente S ha due accessi sulla strada, uno per il piano inferiore, con i consueti due gradini da scendere per entrare nella bottega e uno per il piano superiore, leggermente rialzato rispetto alla strada (Fig. 78).



Fig. 78. Gli ambienti S e T, perfettamente simmetrici; immagine e modello

Il muro su cui si imposta la scala lo divide in una sorta di disimpegno e in un ambiente più ampio, sul retro, sulla cui parete di fondo è visibile un'apertura tamponata (attualmente confinante con il limite di scavo che poteva forse condurre alla strada di servizio sul retro. Il sottoscala, a

sinistra dell'ingresso principale, differente da quelli analizzati negli altri ambienti, forma una vaschetta in muratura interpretata in fase di scavo come una piccola cisterna (Fig. 79).



Fig. 79. La vaschetta in muratura nel sottoscala degli ambienti T ed S, immagine e modello

Data l'assenza di malte idrauliche, potrebbe però trattarsi di un semplice deposito di derrate o un piccolo granaio. Per S si ipotizzano, almeno nella fase finale, due diversi proprietari per il piano inferiore e quello superiore dal momento che il piano terra non comunica con la scalinata che porta al piano superiore. L'ambiente T, con apertura esattamente "speculare" rispetto a S è composto da una stanza unica al piano terreno, a cui si accede sempre scendendo i due gradini. In questo caso però, il piano inferiore comunica col superiore a cui si accede sia dalla bottega sia dalla strada. Il sottoscala anche in questo caso, sotto la volta a botte su cui si imposta la scalinata, scopre una sorta di vasca rettangolare realizzata in muratura. Grazie a questo ambiente possiamo avere un'idea di quale

fosse l'altezza dei solai in tutta l'area residenziale. Il muro Ovest, infatti, a circa tre metri dal piano pavimentale della bottega, mostra gli incassi delle travi di legno che reggevano il solaio del piano superiore. I due ambienti condividevano probabilmente la stessa copertura e gli ambienti al piano superiore erano verosimilmente separati. Con ogni probabilità il settore proseguiva con altri lotti dalle caratteristiche analoghe che al momento non sono ancora stati indagati.

4.4. Dati di scavo, confronti, contesto storico: restituzione filologica o compromesso? Il dilemma delle aperture.

Sin dalla prima analisi dell'edilizia abitativa nei settori I e III di Cencelle, si era sempre presentato un dilemma alquanto complesso da risolvere: quello delle aperture. In una prima versione dei modelli si era tenuto conto dei confronti con località limitrofe del viterbese, citate in precedenza, dove ancora sopravvivono tipologie abitative simili a quelle di Cencelle. In questi casi e a parità di collocazione cronologica, le aperture riportano generalmente un arco a tutto sesto, che diventa a volte a sesto ribassato negli accessi ai piani seminterrati o nella parte inferiore di un "profferlo". In una prima modellazione dunque, si erano interpretate come analoghe anche le aperture di Cencelle. Trattandosi di una modellazione filologica, però, bisognava anche tener conto delle evidenze che, al contrario di ogni previsione derivata dai confronti, raccontavano che a Cencelle ben pochi conci ad arco erano stati rinvenuti nel corso delle campagne di scavo, dunque le aperture andavano rese come architravate, con forma quadrangolare. Dunque cosa fare?¹⁷⁵ Tener conto degli esempi e dei confronti diffusi massicciamente in tutto l'alto Lazio o prestare fede all'evidenza di una quasi totale assenza di conci ad arco o conci chiave? Il dibattito è proseguito e probabilmente proseguirà ancora, ma per la resa tridimensionale si è deciso di raggiungere un compromesso: dal momento che, come già enunciato, i modelli prodotti

¹⁷⁵ Un dilemma analogo si era presentato anche per la modellazione 3D di Bologna nel corso del progetto NU.M.E. (Bocchi 1999)

sono modulari, si è deciso di creare in Blender un ulteriore livello, allineato al primo, che permette con il comando di “*switch-on switch-off*” dei livelli, di “accendere” o “spegnere” gli archi al di sopra delle aperture (Fig. 80).

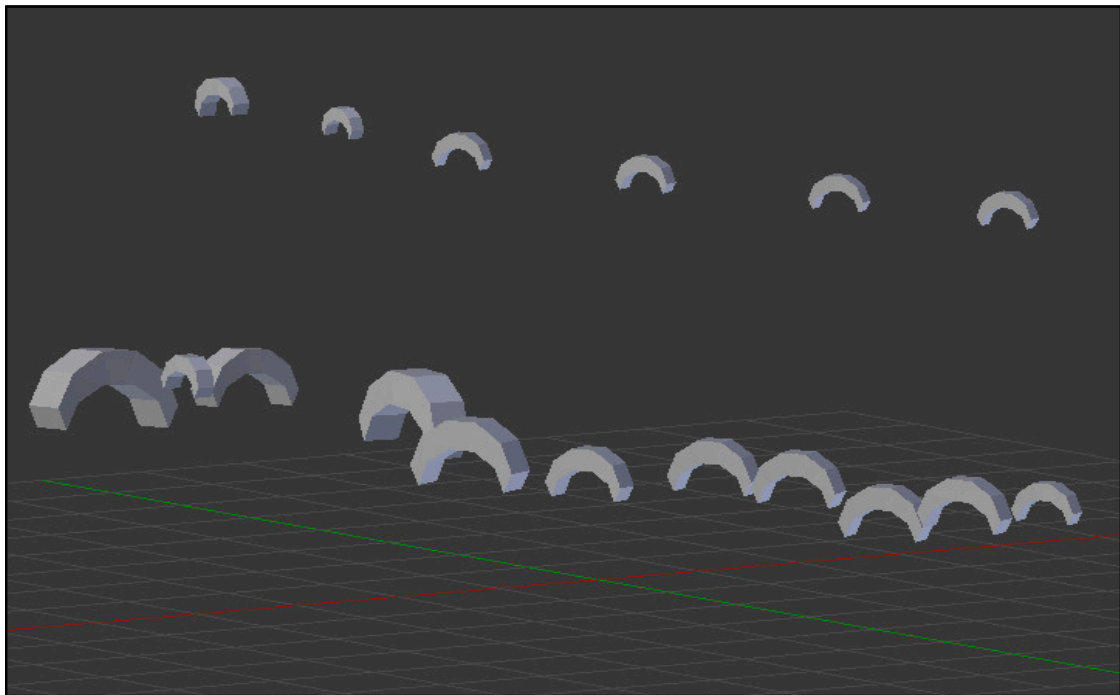


Fig. 80. Il livello delle aperture ad arco da aggiungere o sottrarre a seconda delle interpretazioni all'interno di Blender e di MeshLab

Il risultato è una nuova modellazione (Fig. 81) che segue i canoni delle abitazioni medievali della Tuscia e permette una doppia visualizzazione, almeno fino a che non si farà chiarezza sulla tipologia delle aperture.



Fig. 81. La versione del modello con aperture ad arco, creata aggiungendo un nuovo livello in Blender

4.5. Dati di scavo, dati 3D, modelli tridimensionali: integrazione, interpretazione e comprensione

Una volta ottenuti tutti i dati, una fase fondamentale riguarda la possibilità di mostrarli in connessione per visualizzare il *workflow* che ha portato alla rappresentazione finale. Si è scelto, per questa versione cartacea, di mostrare una parte degli esempi di integrazione relativi al settore III di Cencelle. Il punto di partenza è stata la documentazione cartacea e quella in CAD realizzate in fase di scavo dallo staff dell'*École Française de Rome*. Si tratta di tradizionali piante di scavo con la caratterizzazione di materiali e murature (Fig. 82).

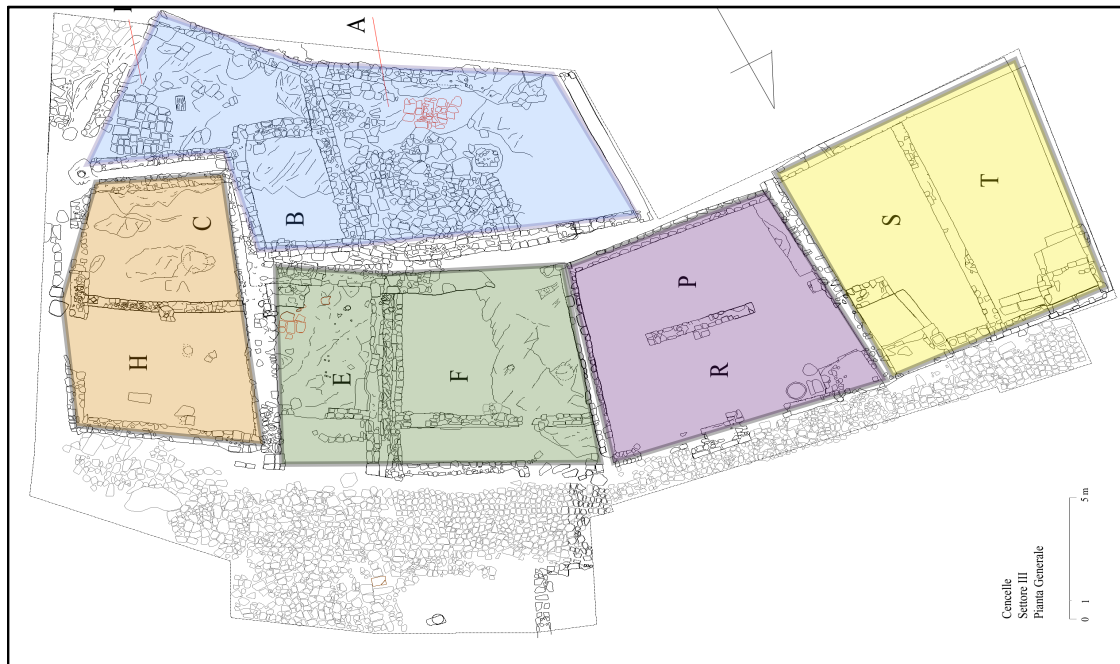


Fig. 82. La pianta del Settore III elaborata dall'*École Française de Rome* con i gruppi di edifici evidenziati con colori diversi

In Blender si è attribuito a un piano la pianta come *texture*, in modo da averla come riferimento sia per le estrusioni degli ambienti, sia per l'allineamento delle *mesh* poligonali scalate. (Fig. 83).

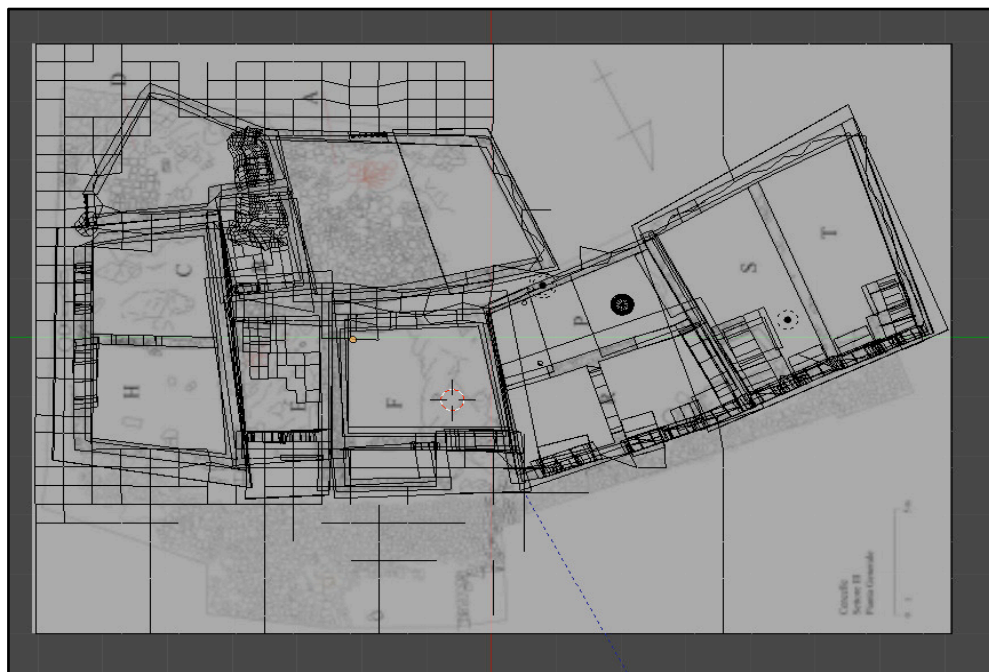


Fig. 83. La visualizzazione in Blender della pianta di scavo integrata nel modello 3D

Le *mesh* poligonali create in PhotoScan sono state importate in Blender, allineate alla pianta e usate come punto di partenza per il processo di modellazione (Figg. 84-85).

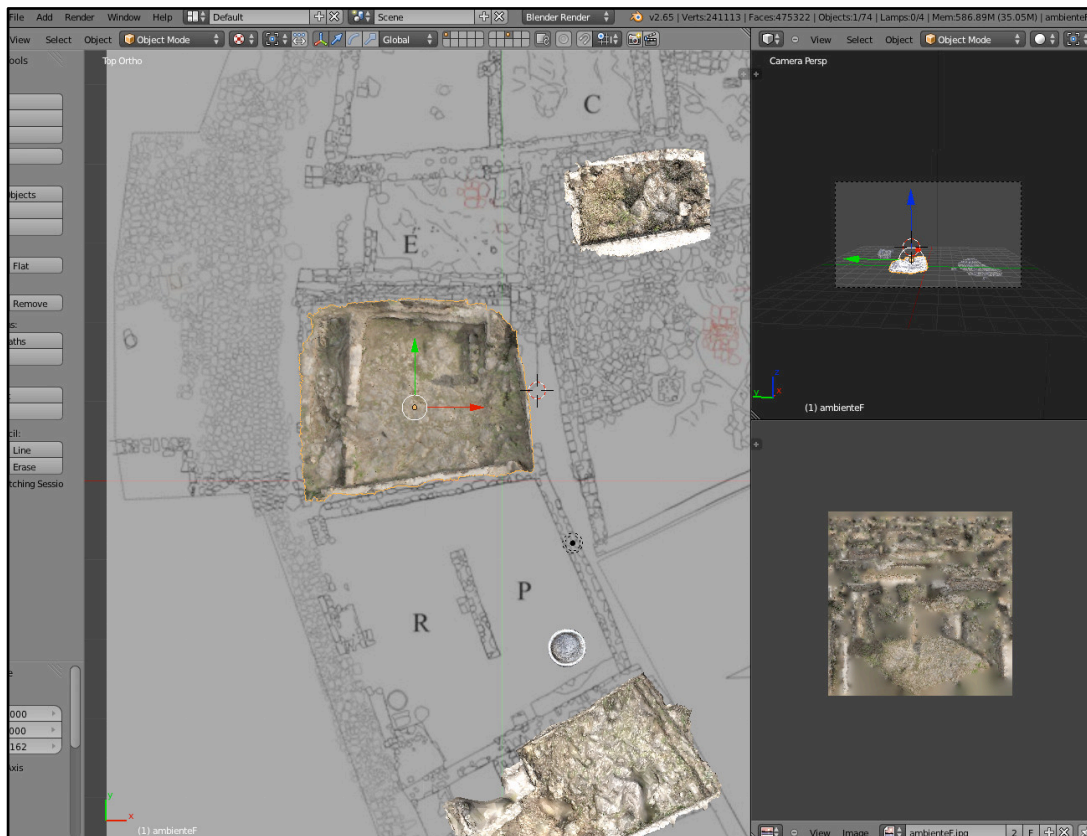


Fig. 84. Le *mesh* poligonali realizzate in PhotoScan allineate alla pianta di scavo in Blender

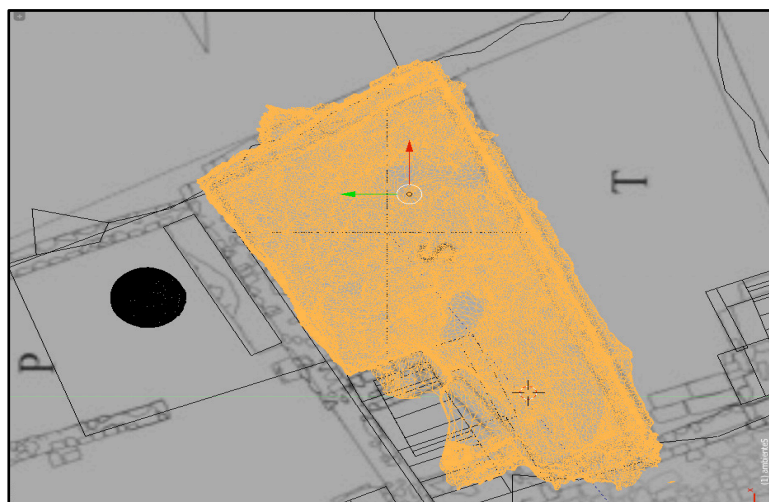


Fig. 85. La *mesh* dell'ambiente S in visualizzazione *wireframe*

Dunque si è iniziato a costruire la geometria per poter visualizzare le interpretazioni differenti (Figg. 86-87).

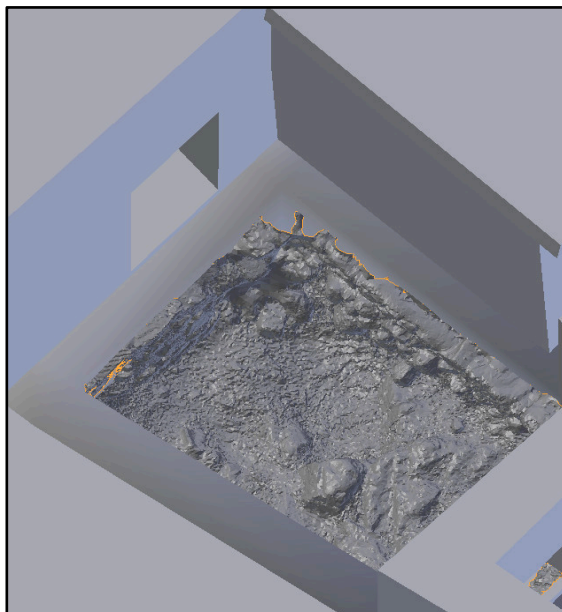


Fig. 86. L'ambiente B, il "granaio" nel corso della modellazione delle ipotesi

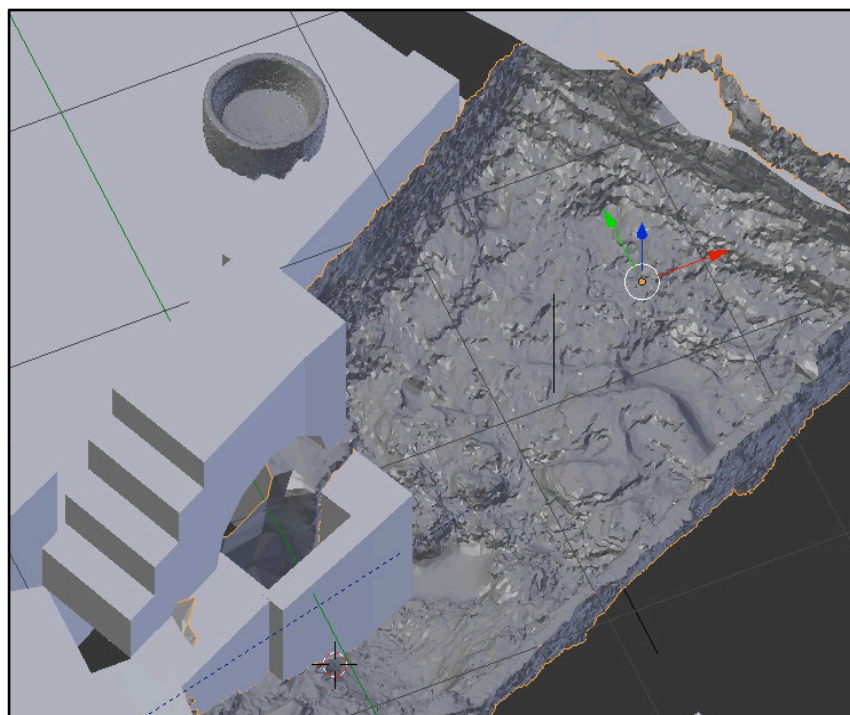


Fig. 87. La *mesh* dell'ambiente S integrata nella modellazione delle ipotesi

Naturalmente per ogni ambiente ci possono essere numerose ipotesi, alcune delle quali sono la combinazione di più d'una. Per questo l'utilizzo

di un sistema modulare che permetta di aggiungere o di sottrarre è l'ideale.

Per fare un esempio chiarificatore si prenderà l'ambiente F, in molte occasioni oggetto di discussione su quale potesse essere il suo assetto più probabile, dal momento che dall'elaborazione dei modelli appare difficile confermare le ipotesi avanzate in una prima analisi derivata dai dati di scavo. Oggi l'ambiente appare, come precedentemente esposto, molto simile all'ambiente E, contiguo, interpretato come una casa (Fig. 88).

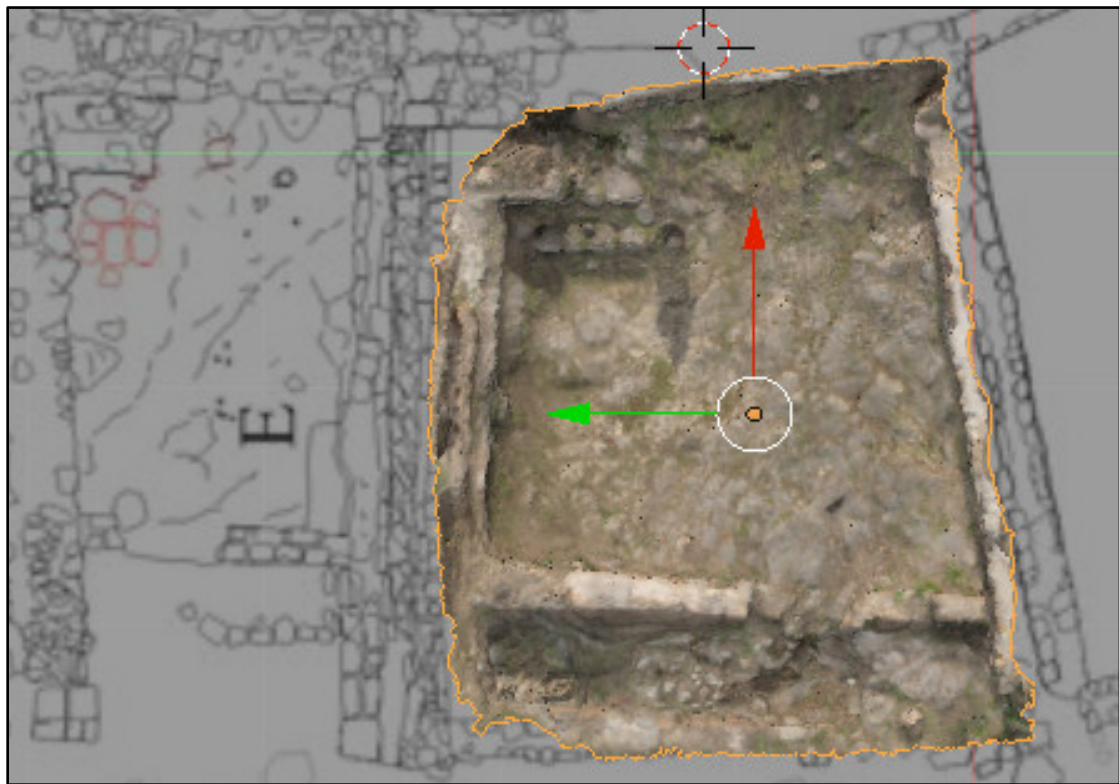


Fig. 88. La *mesh* “texturizzata” dell’ambiente F allineata alla pianta di scavo per elaborare la modellazione delle ipotesi in Blender

L’ambiente F, però, è stato interpretato come una corte, quindi aperto, con un’area adibita al ricovero degli animali. Dalla *mesh* tridimensionale si nota invece che l’ambiente non è mattonato, ha notevoli dislivelli e presenta a lato dell’ingresso una sorta di corridoio chiuso e interrato. Forse un accesso chiuso a un ambiente aperto?

Per verificare quale delle due ipotesi calzasse meglio e per aprire un confronto, si sono realizzate in Blender due proposte di visualizzazione:

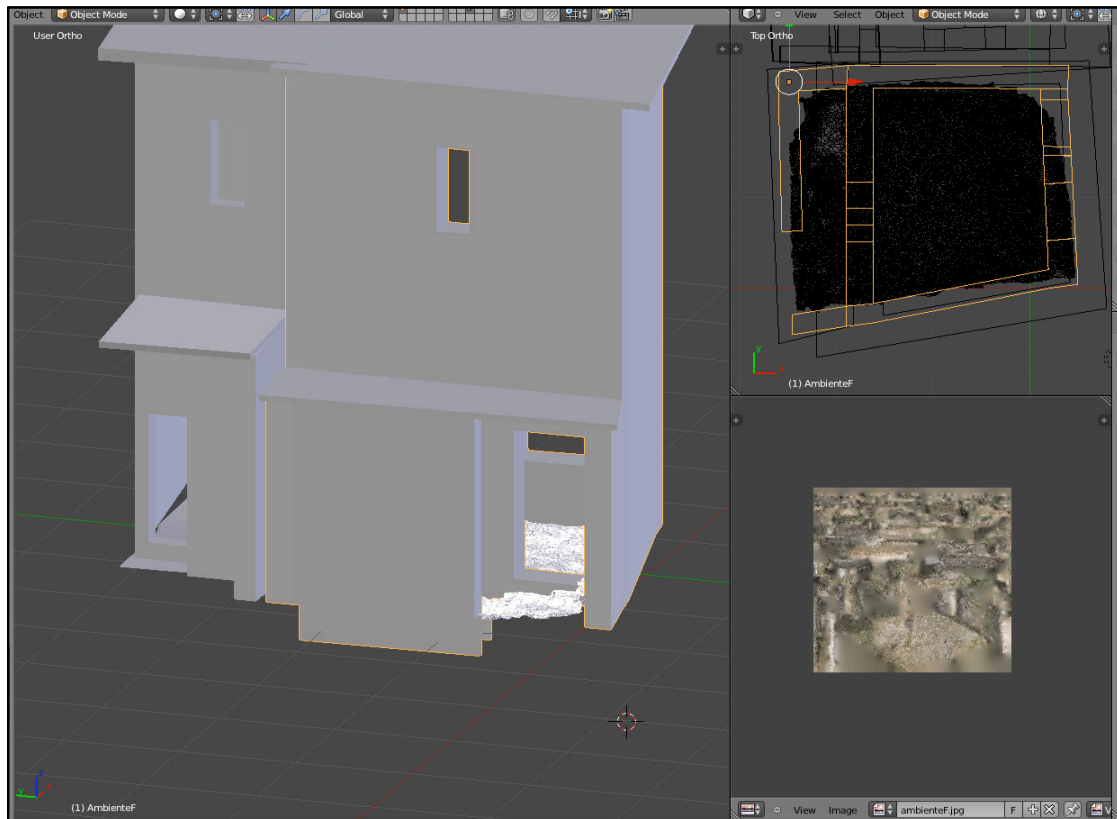


Fig. 89. Ipotesi 1 sull'assetto dell'ambiente F, interpretato come una casa a schiera

- IPOTESI 1: come già avanzato nei paragrafi precedenti, F sembrerebbe una casa a schiera (Fig. 89) in tutto simile alla casa E, ma in scala maggiore, con una sorta di corridoio coperto e a un livello più basso prima dell'ingresso, usato probabilmente come deposito. L'accesso al piano superiore poteva avvenire dalla scala sul fondo della stanza al piano terra, mentre un'apertura posteriore lo metteva in comunicazione con la tracerna sul retro.

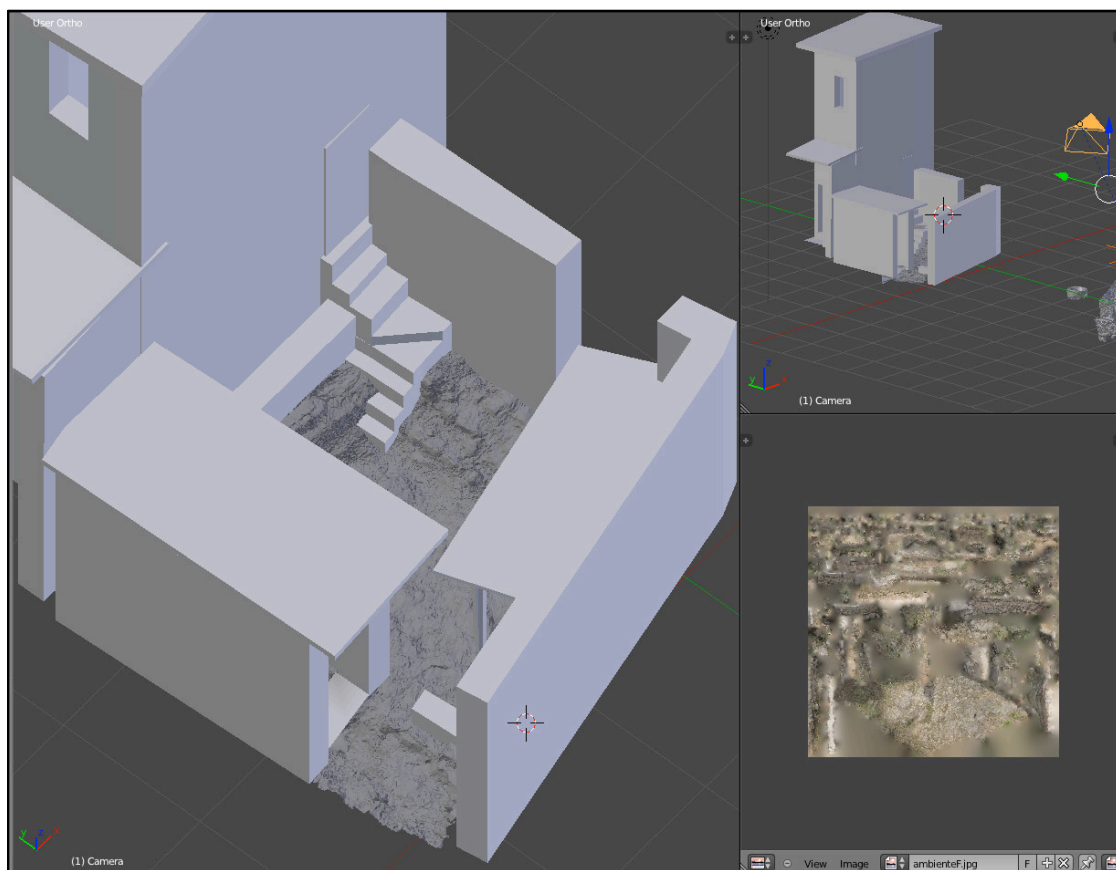


Fig. 90. Ipotesi 2 secondo la quale l'ambiente F è interpretato come un'area aperta

- IPOTESI 2: come sostenuto da chi ha scavato quell'area, sulla base di un'analisi dei dati sul campo¹⁷⁶, F sarebbe un ambiente aperto, una "corte" racchiusa fra gli edifici confinanti. Ad attestarlo è la grande quantità di oggetti metallici rinvenuti *in loco* (fra cui finimenti di cavalli e una spada) che lascerebbero pensare a un luogo di produzione. Ha un corridoio coperto a lato dell'ingresso e l'area confinante col muro Ovest adibita a ricovero per gli animali. La scala sul fondo in una seconda fase di vita, sarebbe stata usata come accesso al piano superiore della casa E, che a un certo punto sarebbe diventata di un proprietario differente rispetto al piano terra. La corte, invece, sarebbe stata un ambiente di passaggio da Nord verso Sud (Figg. 90-91)

¹⁷⁶ Stasolla 2012, pp. 181-196

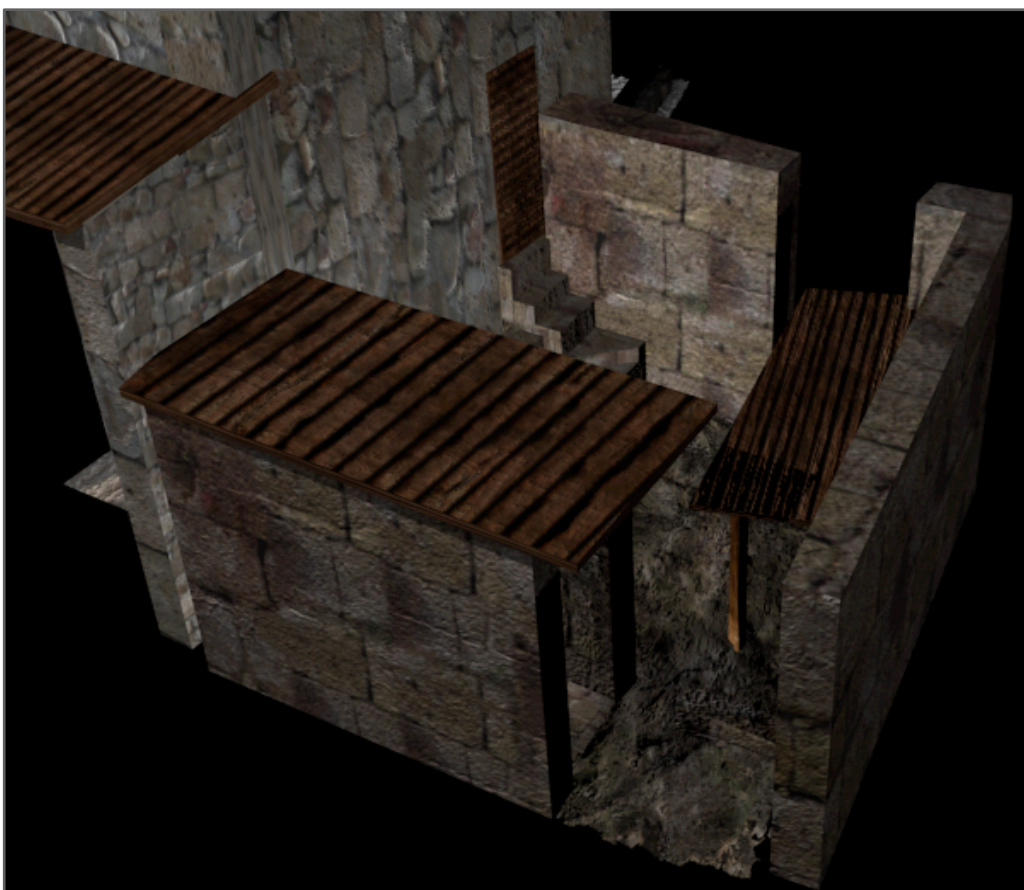


Fig. 91. Ipotesi 2 (in una prova di “texturizzazione”) sull’ambiente F interpretato come aperto

Entrambe le ipotesi sembrano avere punti plausibili, punti meno chiari e altri intercambiabili. Eppure, realizzando il modello ci si è accorti di un particolare: l’ambiente E e l’ambiente F non hanno un muro in comune, bensì due muri che corrono paralleli separati da una stretta tracerna; come poteva la scalinata dunque superarli entrambi? Un elemento plausibile potrebbe essere invece l’ambiente stretto e chiuso all’ingresso, che in questo contesto apparirebbe come una sorta di “capanno per gli attrezzi”. Infine l’area considerata di passaggio non è mattonata (come in altri ambienti considerati aperti proprio in funzione di un rivestimento sul pavimento) ma potrebbe trattarsi di un’eccezione. Infine l’apertura sul retro porta dritta a un allargamento dello stretto viottolo (un po’ più largo di una tracerna) che si viene a formare dallo spazio di risulta fra due muri confinanti: che senso avrebbe usare F come spazio di passaggio fra la via

principale e questo anfratto? Detto questo anche l'ipotesi dell'ambiente aperto resta suggestiva. Il dibattito è aperto.

Un'ulteriore opportunità offerta da questa combinazione di software è la possibilità di inserire all'interno degli ambienti modellati le suppellettili ritrovate o presenti ancora *in situ* frutto anch'esse di acquisizioni in *Computer Vision* scalate in MeshLab alle misure reali (Fig. 92). Questo consente di validare ipotesi sulla loro collocazione in un ambiente piuttosto che in un altro o sulla loro posizione originaria. L'oggetto è stato volutamente lasciato di un colore differente per evidenziare il fatto che si tratta di un oggetto "reale" all'interno della modellazione virtuale.



Fig. 92. La vaschetta circolare del settore III realizzata con PhotoScan, scalata e ri-collocata nell'ambiente P anziché in R dove si trova attualmente

I modelli così realizzati vengono infine collegati alle *mesh* importate, con lo “*snap tool*”, un comando di Blender che permette di connettere i modelli 3D importati con la geometria modellata nel software. Infine vengono esportati in MeshLab. Le potenti funzioni di MeshLab offrono la possibilità di visualizzare i vari elementi singolarmente e di combinarli a seconda di varie interpretazioni.

Sempre MeshLab permette di incrementare le informazioni della documentazione standard con semplici *tool* che, applicati a una sezione 3D, rispondono a molte più domande. Si è provato dunque a importare in MeshLab un modello tridimensionale ottenuto in *Computer Vision* o con acquisizioni da laser scanner e a scalarlo (Fig. 93).

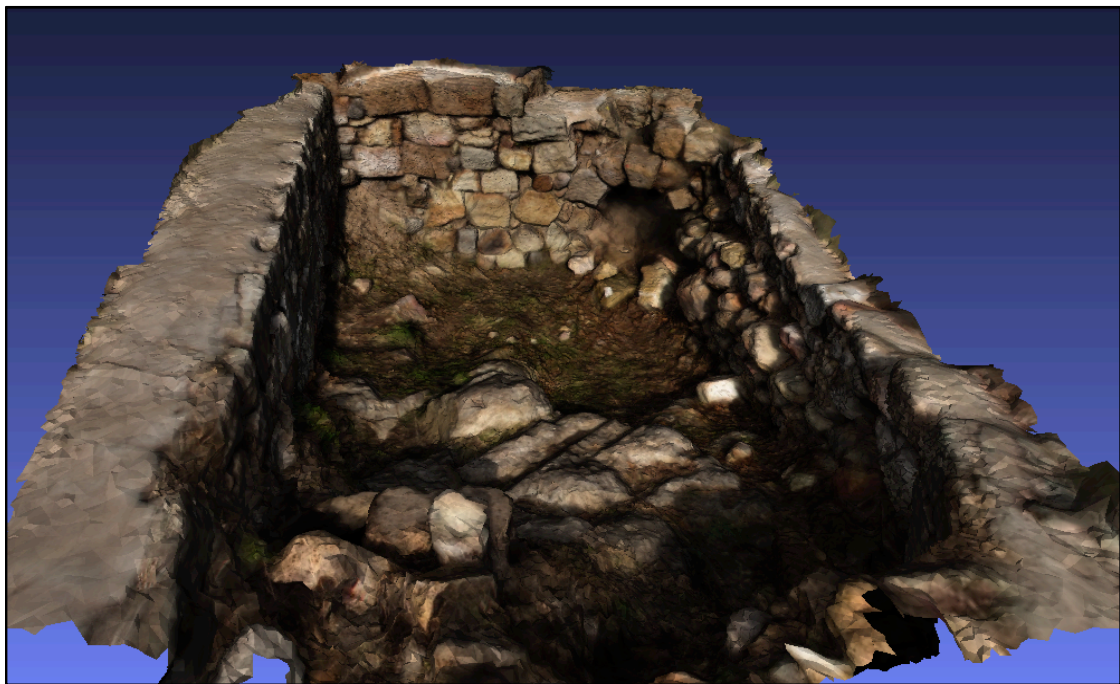


Fig. 93. La *mesh* poligonale dell'ambiente B importata in MeshLab

Si è tagliato il modello ricavandone una sezione e si è provato a compararne la versione tradizionale con quella 3D.

Un prospetto o una sezione tradizionale disegnati a mano (Fig. 94) possono dare informazioni sui materiali caratterizzati, sullo stato del muro e sulla sua forma.

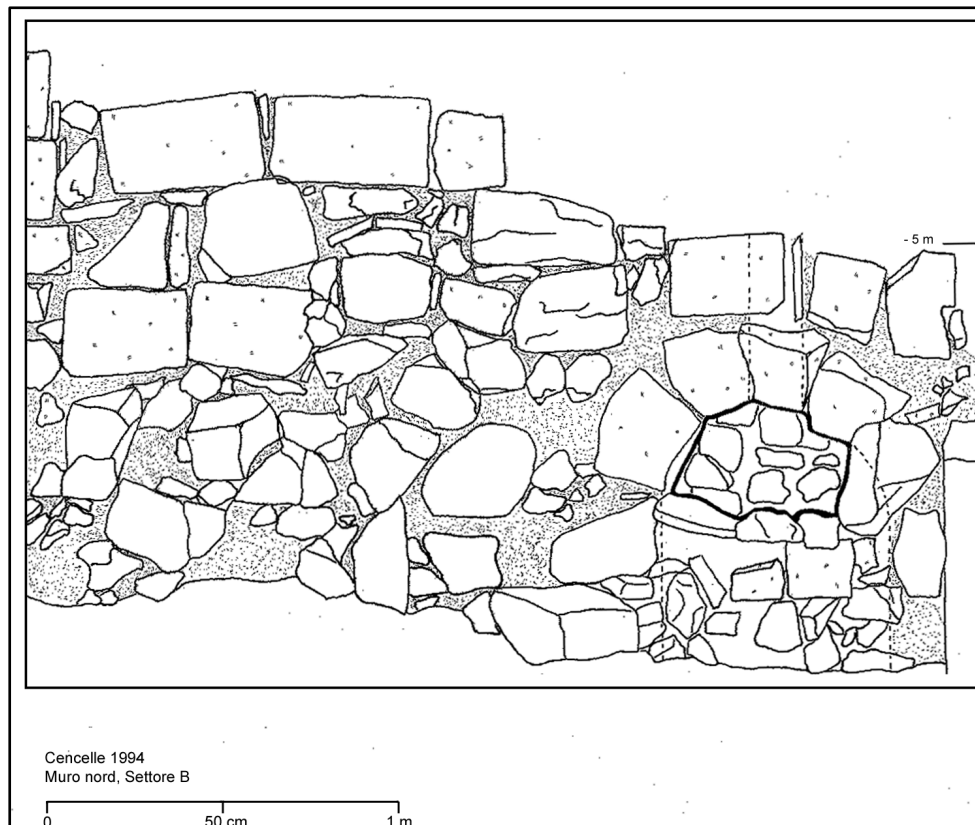


Fig. 94. Il prospetto del muro Nord dell'ambiente B disegnato a mano nel corso dello scavo

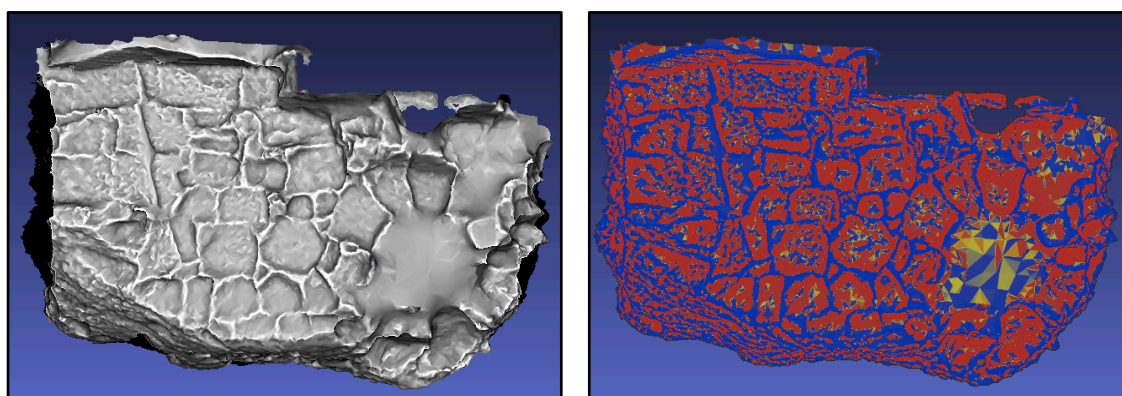


Fig. 95. Il filtro “Radiance” e “Radiance color” applicato in MeshLab al modello del muro nord dell'ambiente B

Se invece si utilizza un prospetto 3D e vi si applicano filtri differenti come nell'esperimento condotto (Fig. 95), la quantità di informazione sarà

amplificata dalla possibilità di visualizzare elementi come lo stato di conservazione, lo spessore, la posizione reale dei conci come dati oggettivi, slegati dall'interpretazione o dalle doti artistiche di diversi archeologi. Senza contare possibilità ulteriori -e potenzialmente infinite- di visualizzare in maniera immediata caratteristiche del sito che solitamente vengono documentate in una sezione bidimensionale, come ad esempio gli oggetti che si trovano alla stessa quota¹⁷⁷.

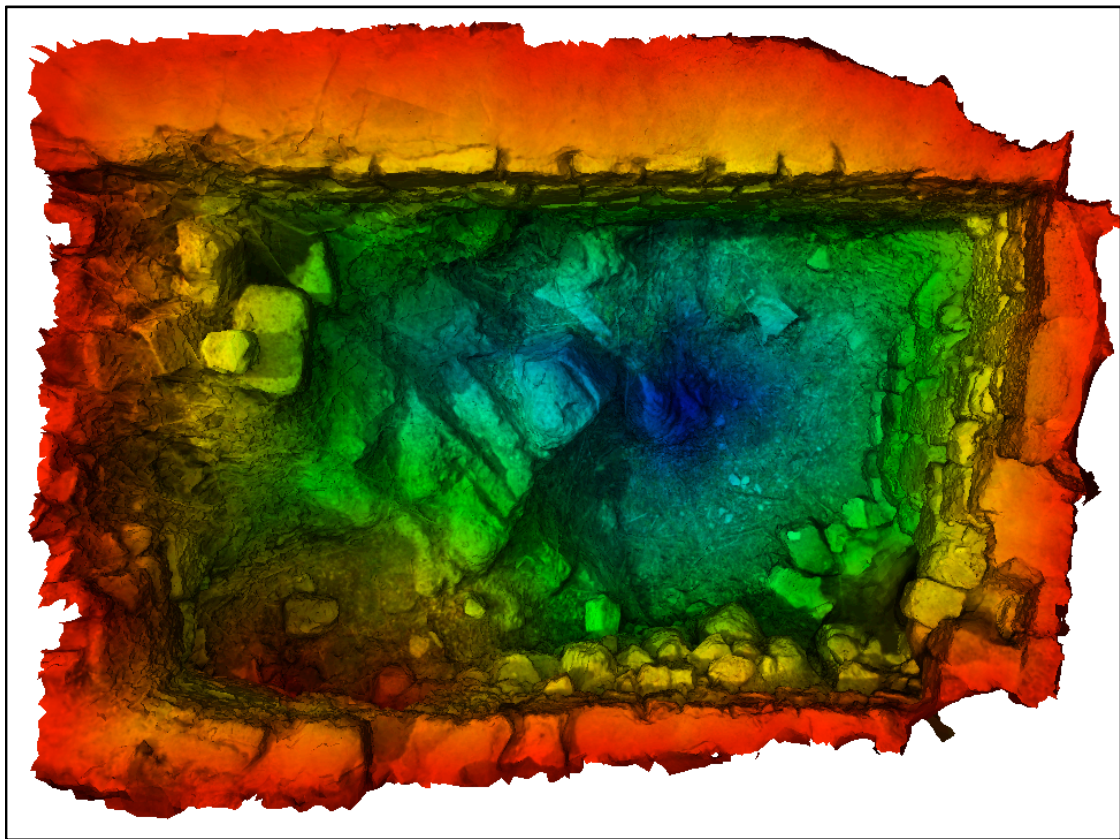


Fig. 96. Il filtro “Color by border distance” applicato alla *mesh* dell’ambiente B in MeshLab

4.6. Visualizzazione e comunicazione

Come conclusione di un’operazione di raccolta di una mole così cospicua di dati, vi è senza dubbio la comunicazione. Anche per questo *step* si è scelto di coniugare più metodi, partendo da un’esigenza di sostenibilità, di portabilità e di integrabilità. MeshLab permette la visualizzazione

¹⁷⁷ Il filtro “Color by border distance” rileva la distanza geodesica dai bordi e colora la *mesh* di conseguenza

modulare e in livelli delle geometrie con la possibilità di passare da un modello all'altro “accendendo” o “spegnendo” livelli. Una delle caratteristiche più importanti del software è la possibilità di visualizzare facilmente una *mesh* e creare uno *snapshot*, oltre al gran numero di funzionalità per arricchire la visualizzazione, evidenziare i dettagli, e aggiungere informazioni alla geometria, come già visto negli esempi precedenti.

La prima fase della comunicazione del progetto sarà quella a livello accademico; dunque una prima implementazione, quella da proporre anche sul campo, mostrerà la geometria frutto delle acquisizioni *laser scanner* e fotografiche, allineate, integrate e visualizzate con una navigazione manuale. Per la fruizione in tempo reale all'interno dei modelli, invece, si è scelto Unity, un ecosistema per sviluppo di piattaforme tridimensionali *gaming*, con motore di *rendering* e strumenti per la creazione di contenuti 3D interattivi¹⁷⁸. L'idea di base è di partire dal presente, mostrando la situazione attuale dello scavo, per tornare gradualmente al passato mostrando le ipotesi sull'aspetto della città nella sua ultima fase di vita.

Ma Cencelle si prepara a fare un passo più lungo: è in programma infatti per il 2014 una mostra ospitata nei Mercati di Traiano a Roma¹⁷⁹, che mostrerà parte delle decorazioni architettoniche, dei reperti e dei dati raccolti in quasi due decenni di scavo. Qui, in uno spazio apposito verranno mostrati tutti i dati tridimensionali acquisiti e modellati negli anni. Per questa occasione si inizia a discutere sul tipo di interfaccia utente da utilizzare. L'idea iniziale era quella di creare un ambiente immersivo; si tratta di una forma di visualizzazione che utilizza il *computing* per creare uno spazio nel quale uno o più utenti sperimentano situazioni di stimolazione percettiva. L'interazione ha luogo attraverso interfacce

¹⁷⁸ <http://unity3d.com/unity/>

¹⁷⁹ La mostra è attualmente in fase di organizzazione da parte della Cattedra di Archeologia medievale della Sapienza, a cura delle professoresse L. Ermini Pani e F. R. Stasolla.

utente al fine di ricreare un mondo o situazione fittizia che però appaia realistica. Una delle tecniche frequentemente utilizzate è di permettere all'utente di interagire in maniera significativa sull'ambiente virtuale, tramite l'uso di sensori (per esempio per il movimento). A questo fine si pensava di creare una CAVE¹⁸⁰ (*Cave Automation Virtual Environment*) un ambiente virtuale nel quale alcuni proiettori proiettano immagini sui tre, quattro, cinque o sei (anche sul pavimento) muri di un cubo delle dimensioni di una stanza. Si tratta di una soluzione molto suggestiva che permette la navigazione in tempo reale di ambienti virtuali. Nella realtà di Roma, però, bisogna fare i conti con due fattori: in primo luogo la sostenibilità economica di un simile tipo di visualizzazione, connessa indissolubilmente agli sponsor, secondariamente, il fatto che una CAVE potrebbe essere realizzata probabilmente in una delle *tabernae*. In un ambiente affollato come i Mercati Traianeî distribuire occhiali 3D e limitare l'accesso a gruppi di poche persone appare difficile a meno di non accettare in partenza un numero minore di visitatori e giudizi critici. La scelta finale ricadrà probabilmente sulla proiezione di un video in *loop* che mostrerà i modelli e racconterà la storia di Cencelle e degli scavi. A questo fine, per rendere il racconto comprensibile e gradevole, si utilizzerà la tecnica dello *storytelling*, scegliendo un personaggio chiamato a narrare ciò che accadde a partire da quell'Agosto dell'854. I personaggi di certo non mancano, così si farà tornare in vita il *Magister Militum*, il Podestà, il fabbro Guidone, il campanario e il menestrello, i personaggi che daranno voce al racconto dello scavo e della città.

180 Il nome, non a caso, si rifà al mito della caverna di Platone, nel quale il filosofo contempla la percezione, la realtà e l'illusione.

CONCLUSIONI

I due punti fondamentali affrontati in questo lavoro: l'integrazione di metodi 3D all'interno dello scavo e il loro utilizzo per l'interpretazione, costituiscono la conclusione di un percorso di apprendimento durato tre anni che ha permesso a chi scrive di approfondire le conoscenze della *digital archaeology*. Un punto fondamentale a cui si è giunti attraverso il lavoro sul campo, la formazione in aula, il *training* sui software, è la consapevolezza che come lo scavo è un'entità in divenire che si apre continuamente a fornire nuove conoscenze, così deve diventare aperto all'interpretazione, alla comprensione, alla comunicazione.

C'è la consapevolezza, però, che il connubio tra tecnologie per l'acquisizione e la visualizzazione dei dati ed il loro conseguente risultato come sistemi di Realtà Virtuale già sul campo, sia un processo impegnativo che richiede determinazione e adattabilità. Il passaggio dallo stadio sperimentale del lavoro ad applicazioni e piattaforme standardizzate e dalla provata affidabilità è ancora non semplice. Il nocciolo del problema sta nell'approccio metodologico e non nei supporti tecnologici stessi. Tutto il sistema dunque dovrebbe essere interconnesso a un metodo provato, perché le tecnologie cambiano rapidamente, invecchiano, possono non essere compatibili o accessibili, mentre il metodo di interpretazione del dato archeologico, quando è collaudato, cambia molto difficilmente. Un progetto di scavo che includa l'utilizzo di tecnologia 3D è perennemente in evoluzione ma grazie a questo metodo tutti i dati 3D possono essere disponibili immediatamente per il confronto, la discussione e l'interpretazione¹⁸¹. L'uso di metodi differenti in uno scavo come Cencelle, nel 2012 per la prima volta (e si spera anche per le campagne future), ha costituito un valore aggiunto per tutto lo staff di archeologi, producendo nuova conoscenza su come combinare e integrare tecniche differenti per registrare il processo di scavo in tempo

181 Forte *et al.* 2012

reale. Con grande stupore, una parte dello scavo piuttosto complessa, per la presenza di numerose sepolture sovrapposte, è stata descritta in tre dimensioni praticamente in tempo reale. La visualizzazione dei risultati ha permesso di intraprendere una sorta di scavo al contrario, che sovrapponeva nuovamente gli strati l'uno all'altro, in un viaggio a ritroso che riusciva a dare la percezione delle unità stratigrafiche. Un approccio multi-fattoriale al 3D insieme all'accuratezza e alla disponibilità dei dati, costituiscono un ottimo stimolo per far sì che questo esperimento proceda con risultati che possano essere consultati nel corso degli anni e delle campagne future. L'adozione di tali strumenti aiuta a preservare (in versione digitale) manufatti, strutture, sepolture particolarmente fragili che vanno incontro a un inesorabile processo di deterioramento e che potrebbero scomparire o andare incontro alla distruzione subito dopo essere stati portati alla luce. Anche in termini di costi, un tale metodo risulta assolutamente sostenibile (a parte i costi ancora elevati per l'acquisto di un *laser scanner* quando non sono disponibili fondi da *sponsorship*) grazie all'utilizzo di software *low-cost*, *open source* e normali fotocamere. Va anche rimarcato come debba diventare flessibile¹⁸², per cercare di adeguarsi il più possibile alla variabilità dello scavo e per rendere dinamico e creativo un processo che va sì studiato ma anche comunicato. Un processo evolvente e ben articolato non può che portare a nuove domande di ricerca.

I modelli, il prodotto finale, costituiscono il mezzo per spiegare con un linguaggio visuale la connessione tra il sito e la sua interpretazione, comunicando non solo informazioni puntuali, ma l'intero processo di indagine archeologica.

A tale proposito, nella seconda parte del presente lavoro e dopo una documentazione critica sull'argomento, si è scelto l'uso del termine "visualizzazione" e "modello" anziché "ricostruzione". Tale scelta indica un

182 Del'Unto et. al. 2013

approccio differente alla creazione di immagini che raffigurano il passato. Si tratta di una distinzione dovuta, utile sia per l'autore sia per il pubblico, perché si allontana dall'idea di ri-creare accuratamente un oggetto. Al contrario, la meta del processo di ricerca narrativa visuale è una piattaforma visiva per la discussione di varie ipotesi (come ad esempio per la questione delle aperture a Cencelle) accettando le modifiche derivanti dall'interpretazione umana¹⁸³. Una rappresentazione tridimensionale, soprattutto se di uno scavo, non dovrebbe essere statica, ma in continuo divenire, come è in continuo divenire la conoscenza nel corso dell'indagine sul campo: "*temporary states in a process of coming to know*"¹⁸⁴ anziché una conoscenza certa. Certo, la strada è ancora lunga, soprattutto perché chi è abituato a una visualizzazione cartacea ritenendola -a volte erroneamente- precisa al millimetro e molto più accurata, continuerà a considerare un *render* ottenuto da un modello 3D come qualcosa di ingannevole, che sembra esprimere solo una verità chiusa sul passato. In realtà la modellazione 3D permette di esprimere visualmente una moltitudine di ipotesi in forma di esemplificazioni del caso-studio. Sarebbe una sorta di rivoluzione proporre anche ai visitatori, non una sola ipotesi, ma coinvolgerli in un confronto riguardo la storia dell'indagine sul campo, usando il potere e l'immediatezza delle immagini e lo *storytelling*¹⁸⁵. Sarebbe uno strumento prezioso per spiegare, semplificando quando necessario, qualcosa di complesso altrimenti poco accessibile a un pubblico di non specialisti, se esposto solo a parole. Serve un uso del 3D che calzi a pennello sia per una discussione fra gli specialisti, sia per la comunicazione al grande pubblico. Inoltre un pubblico che sia in grado di seguire il processo di interpretazione trae dalla visita un'esperienza istruttiva e apprezza senz'altro che in una

183 Baker *et al.* 2012

184 McCarty in Baker *et al.* 2012 - p. 248

185 Definizione di Storytelling: "Storytelling is the interactive art of using words and actions to reveal the elements and images of a story while encouraging the listener's imagination". <http://www.storynet.org/resources/whatisstorytelling.html>

visualizzazione ci sia un velo di incertezza legata all'indagine in corso, piuttosto che vedersi propinata un'unica verità "imposta".

L'ultimo *step* è dunque la comunicazione. Un approccio ancora raro per contesti italiani, nonostante sempre più di frequente si parli di *open data* in Archeologia, consisterebbe nel coniugare, integrare e far andare di pari passo ricerca e comunicazione. Una tale operazione costituirebbe una grande opportunità sia in termini di potenziamento della ricerca sia in termini di visibilità. Mettere in atto un tale progetto però, richiederebbe tempo soprattutto per via della vastità ed eterogeneità dei dati. Immaginare un contesto che raduni fisicamente -o virtualmente- gli archeologi per arrivare a trasformare le loro teorie in oggetti pubblicamente visualizzabili in 3D potrebbe portare a una comprensione più profonda e a grandi benefici nel campo della ricerca per un sito dall'altissimo potenziale come Cencelle.

Infine un esperimento e, si spera, un progetto concreto da portare avanti nel futuro prossimo, potrebbe essere la possibilità di rendere "vivi" i modelli 3D. Dal punto di vista della valutazione degli spazi della vita quotidiana, il modello in sé è sterile, non dà l'idea delle proporzioni. L'idea sperimentale è quella di aggiungerci esseri umani, vita, movimento anche sporco e disordine (perché no) per riuscire a valutare correttamente e metricamente, grazie a *tool* di *Motion Capture*, lo spazio e il suo utilizzo e di comprendere i motivi che hanno portato a un certo assetto, a determinate modifiche o a una tale disposizione. Numerosi esperimenti in proposito sono già stati iniziati e sono ancora in corso, con risultati soddisfacenti. Sarebbe un metodo per interpretare e comunicare che passando per la realtà aumentata andrebbe oltre il virtuale, come nell'intento di questo progetto, inserendo esseri umani in un modello, aumentare il virtuale con la realtà.

GLOSSARIO

• TERMINI ARCHEOLOGICI / ARCHITETTONICI

Arco a sesto ribassato

Un arco si dice a sesto ribassato quando il centro verso il quale tendono i giunti dei cunei si trova più in basso della linea d'imposta. È un tipo di arco più economico e meno impegnativo; a parità di larghezza della luce l'arco ribassato genera un'apertura più bassa.

Arco a tutto sesto

È un tipo di arco contraddistinto da una volta a semicerchio. È detto anche arco a pieno centro. È la tipologia più semplice di arco e prevede che il centro si trovi sulla linea d'imposta, cioè su quella linea che unisce i punti dove finiscono i sostegni e inizia l'arco.

Coppo

Si tratta di un tipo di tegola curva, che in genere serviva a mettere in connessione una copertura di tegole piatte. Se usato come “coppo di colmo, rappresenta la linea di chiusura al culmine di un tetto a doppio spiovente. Molto spesso veniva utilizzata anche come base per sistemi idraulici e canalette di scolo.

Cultural Heritage / Patrimonio Culturale

Le categorie previste dalla Convenzione Internazionale per la Salvaguardia del Patrimonio Culturale comprendono beni culturali, a prescindere dalla loro origine o dalla loro proprietà: beni mobili o immobili di grande importanza come monumenti architettonici, di arte o di storia,

religiosi o laici; località archeologiche; complessi di costruzioni che offrano un interesse storico o artistico; opere d'arte, manoscritti, libri, nonché collezioni scientifiche e collezioni importanti di libri o di archivi; gli edifici, la cui destinazione principale ed effettiva è di conservare o di esporre i beni culturali mobili, i centri comprendenti un numero considerevole di beni culturali.

Malta idraulica

La malta idraulica (nota anche come “malta pozzolanica” o “cocciopesto”) è composta da frammenti di laterizi, tegole e mattoni frantumati e malta fine a base di calce. Era già conosciuta dai Fenici e dai Romani e veniva utilizzata per impermeabilizzare i sistemi di adduzione dell'acqua come acquedotti e cisterne.

Profferlo

Si tratta di un elemento architettonico (detto anche “cimasa” nel resto d'Italia) costituito da una scala esterna in pietra, aggettante sulla facciata della casa, parallela o perpendicolare a quest'ultima, aggiunta spesso in un secondo tempo (in genere pieno medioevo ed età comunale) con la funzione di separare i due ingressi all'abitazione. L'accesso al livello inferiore (generalmente quello della bottega, o del magazzino) viene a trovarsi, quando la scala è parallela alla facciata, al di sotto di questa, mentre all'abitazione si accede dalla scala che dà su un piccolo ballatoio, spesso coperto.

Prospetto

Disegno, rappresentazione grafica in proiezione ortogonale sul piano verticale di un edificio, di un elemento architettonico o dei resti di una struttura verticale.

Sezione

La sezione archeologica è uno spaccato del disegno di un'area lungo un punto determinato, che permette di visualizzare la dimensione verticale della stratigrafia così come si è depositata nel tempo.

Tracerna

Lo spazio fra due edifici a schiera medievali, utilizzato come intercapedine per l'aria, per lo scarico delle acque nere e talvolta come immondezzaio.

Trachite

La trachite (in greco τραχύς che vuol dire "scabra", "ruvida") è una roccia magmatica effusiva con un contenuto medio di silice e di alcali. Data la resistenza e la facilità di lavorazione, viene tuttora commercializzata come roccia lavorabile per l'edilizia e l'arredo urbano.

• GRAFICA 3D E DIGITAL ARCHAEOLOGY

3D Scanning

È una forma di misurazione automatica delle proprietà geometriche degli oggetti. Il modello digitale prodotto è formato da informazioni geometriche che sono state misurate e possiedono qualità metriche.

Allineamento

L'allineamento, manuale o automatico delle nuvole di punti, inserisce ogni parte del modello (che originariamente ha il proprio sistema relativo di coordinate, senza una relazione spaziale tra le varie nuvole) in un sistema di riferimento comune.

Augmented Reality / Realtà Aumentata

La Realtà Aumentata è un sistema di rappresentazione che integra immagini digitali con la visione del mondo reale attraverso dispositivi di calcolo mobili o fissi.

Avatar

In ambito informatico un *Avatar* è una rappresentazione grafica dell'utente, pari a un alter ego che in mondi virtuali può prendere una forma tridimensionale.

CAD

Computer Aided Design; indica l'utilizzo della *Computer Graphics* per il disegno tecnico e la progettazione in due o tre dimensioni.

CAVE

Cave Automation Virtual Environment, è un ambiente virtuale formato da tre, quattro, cinque o sei schermi opachi per retroproiezione, installati su una struttura, in modo da formare un cubo delle dimensioni di una stanza. Su tali schermi vengono proiettati modelli 3D per creare un ambiente virtuale CAVE.

Decimazione

È l'operazione di riduzione del numero di poligoni di una *mesh* ai fini di una diminuzione del Livello di Dettaglio per una visualizzazione più rapida.

Extrude / Estrusione

È il comando che in grafica 3D permette di ampliare la superficie nella terza dimensione creando parallelepipedi da rettangoli e cilindri da circonferenze.

Fonti e dati

Tutte le informazioni, digitali e non, che vengono prese in considerazione o influenzano direttamente la creazione dei risultati finali di un processo di visualizzazione digitale

Fotogrammetria

La fotogrammetria è una tecnica che permette di acquisire dati metrici di un oggetto dall'acquisizione di una coppia di fotogrammi stereometrici, individuando la posizione spaziale di tutti i punti di interesse.

Georeferenziazione / Georiferimento

La Georeferenziazione è l'attribuzione a un dato di informazione sulla sua posizione geografica, espressa in un Sistema Geodetico di Riferimento.

JPG

Joint Photographic Experts Group; è il formato standard di compressione delle immagini fotografiche più comune

Laser Scanner

È uno strumento che permette di ottenere modelli tridimensionali degli oggetti rilevati, a scale e risoluzioni differenti, mediante l'utilizzo di un raggio laser. Esistono varie tipologie dello stesso strumento:

Time Of Flight (TOF) - la distanza del punto da acquisire viene ottenuta misurando il tempo trascorso tra l'impulso laser e la lettura da parte del sensore, divisa (per due volte) per la velocità della luce. La misurazione viene ripetuta secondo una griglia regolare sulla superficie dell'oggetto.

LiDAR - i dati sull'elevazione vengono misurati dai satelliti. Usato in combinazione con con l'analisi di segnali multipli di ritorno può "vedere"attraverso la vegetazione. Usando frequenze differenti e analizzando il segnale di ritorno è possibile distinguere la natura (edificio, strada, acqua, campi...) dell'area indagata.

Phase Shift - la distanza è ottenuta analizzando i cambiamenti nella lunghezza d'onda del raggio di ritorno. La distanza dalla superficie viene misurata da uno specchio retro-riflettente.

Level Of Detail (LOD) / Livello di Dettaglio

È un'operazione di adattamento della geometria di oggetti tridimensionali man mano che la distanza da questi nella visualizzazione aumenta o diminuisce, al fine di utilizzare in modo costante la memoria del computer mentre si visualizzano scene con molti poligoni o oggetti in movimento.

LiDAR

Light Detection and Ranging o *Laser Imaging Detection and Ranging*: una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando interferometria laser. Spesso montati su droni, gli scanner LIDAR permettono di acquisire la forma del terreno in tre dimensioni.

Marker

I *marker* sono oggetti fisici (collocati in prossimità della superficie da acquisire) riflettenti o comunque riconoscibili, che vengono identificati

dallo scanner. La loro posizione è usata come riferimento per l'allineamento delle nuvole di punti.

Mesh

La *mesh* è un insieme di poligoni triangolari o poligonal i cui vertici hanno coordinate cartesiane nelle tre dimensioni.

Metadato

I metadati descrivono altri dati di un oggetto, fornendo ulteriore informazione sulle sue caratteristiche. Ad esempio un'immagine può contenere metadati che ne descrivono le misure, i colori, la risoluzione, la data di acquisizione; un testo può contenere informazioni sull'autore, la data di creazione e il contenuto.

Modello digitale

Rappresentazione della superficie di un oggetto reale o immaginario attraverso l'uso di una *mesh* triangolare.

OpenGL

Open Graphics Library, è una piattaforma multi-linguaggio API (*Application Programming Interface*) per il *render* di oggetti 2D o 3D, che comprende una notevole libreria di funzioni utilizzabili per disegnare complesse scene 3D.

Open Source

È una filosofia che, nell'ambito dello sviluppo di *software* (o di prodotti), promuove un'accesso universale attraverso una licenza libera e gratuita per l'accesso al codice sorgente, la distribuzione universale e il

conseguente miglioramento del prodotto da parte di chiunque voglia contribuire.

Ortofoto

Un'ortofoto è una fotografia aerea geometricamente corretta e georiferita in modo che la scala dell'immagine sia uniforme e la foto possa essere considerata equivalente ad una mappa. Può essere usata per misurare distanze reali poiché raffigura una accurata rappresentazione della superficie terrestre.

Paradato

Informazione sui processi umani di comprensione e interpretazione di dati, come ad esempio le descrizioni, raccolte all'interno di un set strutturato di dati, su come è stato interpretato un manufatto.

PLY

Acronimo per *Polygon File Format*, è un formato di file creato per contenere dati tridimensionali da scanner 3D.

PNG

Acronimo di *Portable Network Graphics*, è un formato grafico *raster* ed è il formato di compressione di immagini senza perdita di dati più usato.

PTX

I file con un'estensione PTX sono usati generalmente da software che contengono file di inizializzazione delle *texture*. Questo file racchiude l'informazione usata per applicare texture a oggetti.

Point cloud / Nuvola di punti

Si tratta di un gruppo di vertici in un sistema tridimensionale di coordinate. Ogni punto è definito da tre coordinate cartesiane. Generalmente questi vertici definiscono la superficie esterna di un oggetto.

Range Map

Ciò che si ottiene da gran parte degli strumenti di *scanning* dopo un'unica acquisizione è un valore di profondità per ogni *pixel*. Tali valori vengono convertiti in una griglia di punti che viene immediatamente triangolata. Il risultato di un singolo *scan* è chiamato *Range Map*. Una *Range Map* è già un modello 3D, anche se incompleto.

Raster

(Letteralmente “rastrello”), detto anche Bitmap, è un formato che descrive un'immagine in digitale con una serie di pixel in un reticolo.

Real time

Funzionamento di un computer che fornisce i risultati dell'elaborazione con un ritardo definito e costante rispetto al momento in cui riceve i dati, risultando in grado di guidare o controllare processi o dispositivi dando l'impressione ad un utilizzatore umano che i comandi abbiano un feedback immediato.

Rendering

Nell'ambito della modellazione 3D indica l'operazione volta a generare un'immagine di una scena 3D che raffiguri geometria, *texture*, illuminazione e materiali attribuiti all'oggetto.

Shape from Stereo

È basata sullo stesso principio della visione umana stereoscopica: due sensori che percepiscono il mondo da due posizioni lievemente differenti. Dalla parallasse è possibile ottenere la profondità di ogni punto visibile. Il cervello umano lo fa in automatico. Una macchina può essere programmata per compiere la stessa operazione.

Sostenibilità

Nello specifico ambito, è la strategia volta ad assicurare che gli elementi informativi più significativi di una visualizzazione digitale vengano preservati per usi futuri.

Stereo Vision

È l'estrazione di informazioni 3D da immagini digitali; comparando la stessa scena da due punti è possibile estrarre informazioni 3D dalle posizioni relative degli oggetti nelle due immagini.

Storytelling

Lo *storytelling* è l'arte interattiva di usare parole o azioni per rivelare gli elementi e le immagini di una storia, stimolando allo stesso tempo, l'immaginazione dell'ascoltatore.

Teleimmersive System

La "Tele-immersion technology" usa sistemi di telecamere e microfoni per catturare scene 3D in tempo reale. In un ambiente tele-immersivo gli utenti, rappresentati come dati 3D, vengono inclusi in una scena virtuale comune nella quale possono interagire con altri utenti in remoto, o con oggetti virtuali condivisi posizionati nell'ambiente.

Texture mapping / Texturizzazione

Si tratta di un metodo utilizzato per aggiungere dettagli a una superficie proiettandovi immagini. Queste serviranno a dare un'impressione realistica di colore, capacità di riflessione, trasparenza e profondità.

TIFF

Tagged Image File Format, è un formato di dati largamente utilizzato per lo scambio di immagini raster fra stampanti e scanner perché permette di specificare numerose indicazioni aggiuntive relative al colore.

Triangolazione

Una luce viene proiettata sulla superficie e il suo riflesso di ritorno viene letto da un sensore. Usando il calcolo trigonometrico si ottiene la posizione tridimensionale dei punti illuminati. Conoscendo l'angolo di emissione e di ricezione e usando la distanza tra l'emettitore e il sensore, viene calcolata la distanza di ogni punto campionato.

UAV / Drone

Unmanned Aerial Vehicle: oggetto volante comandato a distanza utilizzato in archeologia per il rilevamento fotografico aereo.

VCG Library

Visualization and Computer Graphics Library: una libreria di modelli in C++ portabile e *open source* per la manipolazione, il processamento e la visualizzazione di *mesh* poligonali mediante la piattaforma OpenGL.

Vettorializzazione

È l'operazione di conversione di un'immagine *raster* (cioè composta da pixel) in un'immagine vettoriale, cioè composta di punti, linee, curve e poligoni.

Virtual Reality / Realtà Virtuale

La Realtà Virtuale è una simulazione immersiva e interattiva di scene o immagini sia reali che immaginarie.

Virtual Environment / Ambiente Virtuale

Un Ambiente Virtuale è ambiente costituito da modelli tridimensionali che rappresentano dati reali o astratti.

Visualizzazione “Solid”

Lo stile di visualizzazione “*solid*” permette di visualizzare il modello 3D con tutte le sue facce, in maniera compatta, dunque “solida”.

Visualizzazione “Wireframe”

Un modello 3D in versione *Wireframe* (letteralmente “struttura fil di ferro”) consente di visualizzare solo i bordi e le linee del modello, in forma di reticolo, senza superfici.

ABBREVIAZIONI BIBLIOGRAFICHE

Alvaro, Liberotti, Nepi 2009

C. Alvaro, G. Liberotti, D. Nepi, *Architectural analysis and 3D reconstruction: a case study of Leopoli–Cencelle in Italy*, in *CAA 2009-Computer Applications in Archaeology*, Williamsburg - Virginia - USA, March 22-26 2009.

Andrews 1982

D. D. Andrews, *Medieval domestic architecture in Northern Lazio*, in D. D. Andrews, J. Osborne, D. Whitehouse, *Medieval Lazio, Studies in Architecture, Paintings and Ceramics, Papers in Italian Archaeology 3*, BAR Int. Ser. 15, Oxford 1982.

Andrews 1991

D. D. Andrews, *Lo scavo di piazza Duomo. Età medievale e moderna, in Scavi MM3, ricerche di archeologia urbana a Milano durante la costruzione della linea 3 della metropolitana: 1982-1990*, a cura di D. Caporusso, Milano 1991, pp. 163-209.

Ask 2012

C. Ask, *Interpreting in 3D - Employing 3D modeling in field archaeology from research and public communication perspectives*, in Lund Students Theses Database, Lund - Sweden, 2012. <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=2543931&fileId=2543934>

Bailey 1990

D.W. Bailey, *The living house: signifying continuity*, in *The social archaeology of houses*, Edinburgh 1990.

Baker et al. 2012

D. Baker, A. Bentkowska-Kafel, H. Denard, *Paradata and Transparency in Virtual Heritage*, London 2012.

Barceló et al. 2000

J. A. Barceló, M. Forte, D. H. Sanders, *Computer Applications, e Quantitative Methods in Archaeology. Virtual reality in archaeology*, 2000.
http://www.learningsites.com/Support_pages/BFS_VRinA_intro.html.

Benjamin 1969

W. Benjamin, *The Work of Art in the Age of Mechanical Reproduction, Illuminations*, New York 1969.

Bocchi 1984

F. Bocchi, *Informatica e storia urbana. Il catasto di Carpi del 1472 analizzato al computer*, numero tematico a cura di F. Bocchi, in *Storia della città n. 30*, 1984.

Bocchi 1999

F. Bocchi, *New Methodologies. The four dimensional city*, in *Medieval Metropolises Proceedings of the Congress of Atlas Working Group International Commission for the History of Town*, Bologna 1999, pp. 29-33.

Bocchi, Ghizzoni, Smurra 2002

F. Bocchi, M. Ghizzoni, R. Smurra, *Storia delle città italiane*, Torino 2002, pp. 1-257.

Bougard, Cirelli, Lecouyer 1996

F. Bougard, E. Cirelli, N. Lecouyer, *Settore III, in Leopoli-Cencelle, II. Una città di fondazione papale*, (Catalogo della Mostra) (TardoAntico e Medio Evo. Studi e Strumenti di Archeologia, 1), Roma 1996.

Brogiolo 1993

G. P. Brogiolo, *Edilizia residenziale tra V e VIII secolo, IV seminario sul tardoantico e l'altomedioevo in Italia settentrionale*, Monte Barro - Galbiate (Lecco) 2 - 4 settembre 1993, in *Documenti di archeologia*, a cura di G. P. Brogiolo, 1993.

Brogiolo 1996

G.P. Brogiolo (a cura di), *La fine delle ville romane: trasformazioni nelle campagne tra tarda antichità e alto medioevo*, I Convegno Archeologico del Garda, Gardone Riviera (Brescia), 14 Ottobre 1995, Mantova 1996.

Cagiano De Azevedo 1986

M. Cagiano De Azevedo, *Casa, città e campagna nel tardo antico e nell'alto medioevo*, a cura di C.D. Fonseca, D. Adamesteanu, F. D'Andria, Galatina (LE) 1986.

Callieri *et al.* 2011

M. Callieri, N. Dell'Unto, M. Dellepiane, R. Scopigno, B. Soderberg, L. Larsson, *Documentation and interpretation of an archeological excavation: an experience with dense stereo reconstruction tools*, in *Proceedings of the 12th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2011 Prato*, 2012, pp. 33-40.

<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2384501>.

Cesarini 2001

G. Cesarini, *Le case medievali di Piano Scarano a Viterbo: genesi e tipologie*, in *Case e torri medievali, II*, a cura di E. De Minicis, E. Guidoni (Museo della città e del territorio, 12), pp. 178-189.

Chapelot, Fossier 1985

J. Chapelot, R. Fossier, *Le village et la maison au Moyen Age*, Poitiers, 1985.

Cigalino 2001

R. Cigalino, *Case medievali a Vetralla*, in *Case e torri medievali, I*, a cura di E. De Minicis, E. Guidoni (Museo della città e del territorio, 12), Roma 2001, pp. 171- 178.

Clark 2010

J. Clark, *The Fallacy of Reconstruction*, in *Cyber-archaeology*, a cura di M. Forte, Oxford 2010.

Comba 1980

R. Comba, *Cultura materiale e storia sociale nello studio delle dimore rurali*, in *Archeologia Medievale*, VII, 1980, pp. 9 -149

Contus 1990

L. Contus, *Edlizia medievale a Viterbo. Una casa con “profferlo” nel quartiere di San Pellegrino*, in *Storia della Città*, 52, 1990, pp. 109-114.

Corsini et al. 2009

M Corsini, M. Dellepiane, F. Ponchio, R. Scopigno, *Image to Geometry Registration: a Mutual Information Method exploiting Illumination-related Geometric Properties*, in *Computer Graphics Forum*, vol. 28 (7), 2009, pp. 1755-1764.

Delbridge Tompkins 2012

M. Delbridge, J. Tompkins, *Reproduction, mediation, and experience: virtual reality, motion capture and early modern theatre, Space–Event–Agency–Experience*, 2012 <http://eprints.qut.edu.au/40360/>.

Dell’Unto et al. 2010

N. Dell’Unto, M. Wallergård, M. Dellepiane, S. Lindgren, J. Eriksson, B. Petersson, R. Paardekooper, *An Experiment of Integrated Technologies in Digital Archaeology: Creation of New Pipelines to Increase the Perception of Archaeological Data*, in *Proceedings of the 38th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Granada - Spain, April 2010.

Dell'Unto *et al.* 2013

N. Dell'Unto, M. Callieri, M. Dellepiane, A. M. Leander Touati, S. Lindgren, C. Larsson, *Pompei revived: Scanning Mission- insula V 1*, in *CAA-The Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 26-30 March 2012, Southampton 2013, in press <http://www.lunduniversity.lu.se/o.o.i.s?id=24732&postid=3346585>

De Minicis 1999

E. De Minicis, *Scheda Abitazione Centro Abbandonato*, in *Leopoli-Cencelle. Le preesistenze, Tardoantico e Medioevo*, Studi e strumenti di archeologia, 1, Roma 1999.

De Minicis 2001

E. De Minicis, *Edilizia comune e cultura cistercense: la casa medievale in via Gallo a Priverno*, in *Case e torri medievali, I*, a cura di E. De Minicis, E. Guidoni (Museo della città e del territorio, 12), Roma 2001, pp. 186-200.

Dennis 1985

G. T. Dennis (a cura di), *Three Byzantine Military Treatises, Washington 1985, Strategy*, capp. 10-12, pp. 31-37, traduzione italiana di E. Guidoni, *Storia dell'urbanistica. Il Medioevo. Secoli VI-XII*, Roma-Bari 1991, p. 332.

Duchesne 1955

L. Duchesne, *Le Liber Pontificalis, Texte, introduction et commentaire, I-II* (ed.or. 1886 - 1892), Paris 1955.

Ennen 1975

E. Ennen, *Storia della città medievale*, Roma-Bari 1975, p. 151.

Ermini Pani 1999

L. Ermini Pani, *“La città di pietra”: forma, spazi, strutture*, in *Atti della XLVI Settimana CISAM (Spoleto 1998)*, Spoleto 1999.

Ermini Pani 2003

L. Ermini Pani, *Sviluppo Urbano in Il Mondo dell'Archeologia*, Roma 2003, pp. 824-829.

Ermini Pani 2003

L. Ermini Pani, *Cencelle*, in *Lo sguardo di Icaro, le collezioni dell'aerofototeca nazionale per la conoscenza del territorio*, Roma 2003.

Ermini Pani 2007

L. Ermini Pani, *Leopoli-Cencelle: note di urbanistica altomedievale in una città di fondazione*, in *L'Europe en Mouvement, IV Congrès International d'Archéologie Médiévale et Moderne - Paris 1, Sorbonne, 3-8 settembre 2007*, edito in web: <http://medieval-europe-paris-2007.univ-paris1.fr/>.

Ermini Pani, Giuntella 1999

L. Ermini Pani, A. M. Giuntella, *Il progetto del bacino archeologico di Leopoli-Cencelle*, in *Leopoli-Cencelle. Le preesistenze, Tardoantico e Medioevo. Studi e strumenti di archeologia*, 1, Roma 1999.

Fisher *et al.* 2005

R. Fisher, K. Dawson-Howe, A. Fitzgibbon, C. Robertson, E. Trucco, *Dictionary of Computer Vision and Image Processing*, Hoboken 2005.

Forte *et al.* 2012

M. Forte, N. Dell'Unto, J. Issavi, L. Onsurez, N. Lercari, *3D Archaeology at Catalhöyük*, in *International Journal of Heritage in the Digital Era* 1, n. 3, 2012, pp. 351–378.

Francovich, Gelichi, Parenti, 1980

R. Francovich, S. Gelichi, R. Parenti, *Aspetti e problemi di forme abitative minori*, Firenze 1980.

Francovich, Manacorda 1989

R. Francovich, D. Manacorda, *Lo scavo archeologico dalla diagnosi all'edizione*, Pontignano 1989.

Francovich, Tronti, Valenti 2004

R. Francovich, C. Tronti, M. Valenti, *Il caso di Poggio Bonizio (Poggibonsi-Siena): da castello di fondazione signorile a "quasi-città"*, (pubblicazione su volume collettaneo, 2004), in *Le terrenueve fiorentine*, Firenze, pp. 201-106.

Frischer *et al.* 2002

B. Frischer, F. Niccolucci, N.S. Ryan, J.A. Barcelò, *From CVR to CVRO: the past, present, and future of cultural virtual reality*, in F. Niccolucci, (a

cura di) *Virtual Archaeology, Proceedings of VAST Arezzo*, BAR International Series 1075, Oxford 2002, pp. 7-18.

Galetti 1997

P. Galetti, *Abitare nel Medioevo. Forme e vicende dell'insediamento rurale nell'Italia altomedievale*, Firenze 1997.

Galetti 2001

P. Galetti, *Uomini e case nel Medioevo tra Occidente e Oriente*, Roma-Bari 2001.

Giuliani 1990

C. F. Giuliani, *L'edilizia nell'antichità*, Roma 1990.

Guglielmetti 2002

P. Guglielmetti, *Sedi e funzioni civili*, in *Arti e storia nel Medioevo vol II, Del costruire: tecniche, artisti, artigiani, committenti*, pp.170,177,178.

Guidoni 1991

E. Guidoni, *Storia dell'urbanistica, il Medioevo*, Bari 1991.

Guidoni 1996

E. Guidoni, *Analisi storico-urbanistica*, in *Leopoli-Cencelle, una città di fondazione papale*, (Catalogo della Mostra) TardoAntico e MedioEvo. Studi e Strumenti di Archeologia, 1, II, Roma 1996, pp. 10-11.

Hartley, Zisserman 2004

R. Hartley, A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge 2004.

Hermon 2008

S. Hermon, *Reasoning in 3D: a Critical Appraisal of the Role of 3D Modelling and Virtual Reconstructions in Archaeology*, in B. Frischer, A. Dakouri-Hild (a cura di), *Beyond Illustration: 2D and 3D Technologies as Tools for Discovery in Archaeology*, B.A.R. International Series 1805, Oxford 2008, pp. 36-45.

Hermon 2012

S. Hermon, *Scientific Method, chaîne opératoire, and Visualization: 3D Modelling as a Research Tool in Archaeology*, in A. Bentkowska-Kafel, H. Denard, D. Baker (a cura di), *Paradata and Transparency in Virtual Heritage*, London 2012.

Hermon *et al.* 2005

S. Hermon, F. Niccolucci, A. D'Andrea, *Some evaluations on the potential impact of virtual reality on the archaeological scientific research*, in *Proceedings VSMM 2005*, Ghent, Belgium 2005, pp. 105-14.

Hermon, Kalisperis 2011

S. Hermon, L. Kalisperis, *Between the Real and the Virtual: 3D Visualization in the Cultural Heritage Domain-Expectations and Prospects*, in *Arqueologica 2*, Siviglia 2011, pp. 99-103.

Hermon, Nikodem 2007

S. Hermon, J. Nikodem, *3D Modelling as Scientific Research Tool in Archaeology*, in *CAA Conference Proceedings*, Berlin 2007 (CDRom).

Hillier, Hanson, 1984

B. Hillier, J. Hanson, *The social logic of space*, Cambridge 1984.

Hooper-Greenhill 1999

E. Hooper-Greenhill, *Learning in art museums: strategies of interpretation*, in *The educational role of the museum*, Leicester 1999, pp. 44-52.

Leopoli-Cencelle II 1996

Leopoli-Cencelle, una città di fondazione papale, (Catalogo della Mostra) TardoAntico e MedioEvo. Studi e Strumenti di Archeologia, 1, II, Roma 1996.

Leopoli-Cencelle I 1999

AA.VV., *Leopoli-Cencelle, le preesistenze*. Studi e Strumenti di Archeologia, 1, I, Roma 1999.

Lercari 2011

N. Lercari, *Il linguaggio degli ambienti virtuali culturali: comunicare la storia di Bologna attraverso il progetto Nu.M.E.*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Storia e Informatica, Università di Bologna 2011.

<http://amsdottorato.cib.unibo.it/3285/>

Levy *et al.* 2013

T. E. Levy, C. A. Tuttle, M. L. Vincent, M. Howland, A. M. Richter, V. Petrovic, D. Vanoni, F. Kuester, *The 2012 Petra Cyber-Archaeology Cultural Conservation Expedition: Temple of the Winged Lions and environs, Jordan in Antiquity*, Vol. 087 Issue 337, March 2013. <http://antiquity.ac.uk/projgall/levy335/>

Marcelli, Santoni 2001

M. T. Marcelli, F. Santoni, *Case medievali di Blera: l'esempio di via Roma*, in *Case e torri medievali, II*, a cura di E. De Minicis, E. Guidoni (Museo della città e del territorio, 12), Roma 2001, pp.143-148.

Martorelli 1999

R. Martorelli, *Scheda per il Materiale Metallico*, in *Leopoli- Cencelle. Le preesistenze*, Tardoantico e Medioevo. Studi e strumenti di archeologia, 1, Roma 1999.

Martorelli *et al.* 1996

R. Martorelli, A. Sereni, S. Nardi, S. Del Lungo, F. Zagari, *Settore I*, in *Leopoli-Cencelle, una città di fondazione papale*, (Catalogo della Mostra) TardoAntico e MedioEvo. Studi e Strumenti di Archeologia, 1, II, Roma 1996, pp. 54-58.

Marucchi 1899

O. Marucchi, *La iscrizione monumentale di Leopoli*, in *Bullettino di Archeologia Cristiana*, V, 1899, pp. 195-203.

Nardi 1999

S. Nardi, *Note sulla rete viaria e sul popolamento, in Leopoli- Cencelle. Le preesistenze*, Tardoantico e Medioevo. Studi e Strumenti di Archeologia, 1, Roma 1999.

Nardi Combescure 2003

S. Nardi Combescure, *Paesaggi d'Etruria meridionale. L'entroterra di Civitavecchia dal II al XV secolo d.C.*, Firenze 2003.

Pletinckx 2012

D. Pletinckx, *How to Make Sustainable Visualizations of the Past: An EPOCH Common Infrastructure Tool for Interpretation Management*, in A. Bentkowska-Kafel, H. Denard, D. Baker, (a cura di), *Paradata and Transparency in Virtual Heritage*, London 2012.

Quiròs Castillo 2000

J. A. Quiròs Castillo (a cura di), *Archeologia delle strade nel medioevo*, Firenze 2000, p. 15.

Rapoport 1969

A. Rapoport, *House, form and culture*, Endlewood Cliffs, N.J. 1969.

Ricci 1980

G. Ricci, *Bologna*, Roma-Bari 1980.

Roberts, Ryan 1997

J. C. Roberts, N. S. Ryan, Alternative archaeological representations within virtual worlds, Fourth VR-SIG 97 Conference, Brunel University, London 1997

Sagina 1996

S. Sagina, *Ipotesi sulla genesi e sullo sviluppo urbanistico di Grosseto*, in *Grosseto, Roselle e il Prile*, a cura di C. Citter, Mantova 1996, pp. 77-98.

Scharstein, Szeliski, 2002

D. Scharstein, R. Szeliski, *A taxonomy and evaluation of dense two frame stereo correspondence algorithms*, in *International Journal of Computer Vision* 47, 2002, pp. 7–42

Seitz *et al.* 2006

S. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein, R. Szeliski, *A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms*, in *Proceedings of the CVPR' 06 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Volume 1*, IEEE Computer Society, Washington DC 2006, pp. 519-526.

Sereni 2003

A. Sereni, *Edilizia domestica*, in *Il Mondo dell'Archeologia*, Roma 2003, pp. 159-162.

Snavely 2010

N. Snavely, Bundler: *Structure from Motion for Unordered Image Collections*, 2010. <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>

Stasolla 1999

F. R. Stasolla, *Scheda per il Materiale Fittile da Costruzione*, in *Leopoli-Cencelle. Le preesistenze*, Tardoantico e Medioevo. Studi e Strumenti di Archeologia, 1, Roma 1999.

Stasolla 2000

F. R. Stasolla, *“Balnea” ed edifici di culto*, in *Ecclesiae Urbis, I, atti del congresso internazionale di studi sulle chiese di Roma (IV - X secolo)*; Roma, 4 - 10 settembre 2000 / Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana, a cura di F. Guidobaldi - A. Guiglia Guidobaldi, Città del Vaticano: Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana 2002, pp. 143-151.

Stasolla 2012

F. R. Stasolla, *La città medievale*, in *Leopoli-Cencelle: il quartiere Sud-Orientale*, Spoleto 2012, p. 17.

Statuti 1578

AA.VV., *Statutorum Priverni Volumen, Apud Heredes Antonii Bladi, impressori cameralis, Romae*, in *A.S.R., Collezione Statuti*, codice 435, 1578 p. 51.

Szeliski 2011

R. Szeliski, *Computer Vision. Algorithms and applications*, New York 2011.

Ugolini 1978

P. Ugolini, *Tecnologia ed economia agraria dal feudalesimo al capitalismo*, in *Storia d'Italia, Annali, vol. I, Dal feudalesimo al capitalismo*, Torino 1978.

Valenti 1996

M. Valenti, *Poggio Imperiale a Poggibonsi, dal villaggio di capanne al castello di pietra, vol. I, Diagnostica archeologica e campagne di scavo 1991-1994*, Firenze 1996.

Verhoeven 2011

G. Verhoeven, *Taking Computer Vision aloft - archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan*, in *Archaeological Prospection* 18, n. 1, doi:10.1002/arp.399, 2011, pp. 67-73.

Verhoeven et al. 2012

G. Verhoeven, M. Doneus, C. Briese, *Computer Vision techniques: towards automated orthophoto production*, in *AARGNEWS (ONLINE)* 44, n. maart, 2012, pp. 8-11.

Vindry 1983

G. Vindry, *Corredo della casa rurale medievale dagli archivi provenzali alla luce della etnografia*, in *Archeologia Medievale* VII, 1980, p. 133.

RISORSE IN RETE

123D Catch; prodotto *software* Autodesk: <http://www.123dapp.com/catch> [accesso: 03/04/2013]

3D Studio Max; prodotto *software* per modellizzazione tridimensionale: <http://www.autodesk.com/products/autodesk-3ds-max/overview> [accesso: 30/03/2013]

Il Blog di ARCTeam: <http://arc-team-open-research.blogspot.it/2013/03/sfm-for-underground-documentation.html> [accesso: 09/03/2013]

Strumenti di geodesia Altus: <http://www.altus-ps.com> [accesso 05/02/2013]

Blender; strumento *software open source* di modellizzazione tridimensionale: <http://www.blender.org> [accesso: 27/12/2012]

Descrizione generale degli strumenti di *Computer Aided Design*: <http://it.wikipedia.org/wiki/CAD> [accesso: 05/01/2013]

Blog di Nicolò Dell'Unto sulle attività di *Digital Archaeology* a Lund: <http://nico-digitalarchaeology.blogspot.it> [accesso 21/12/2012]

Prodotto *software* ESRI CityEngine per la generazione di modelli tridimensionali a partire da dati geografici a due dimensioni: <http://>

www.esri.com/software/~media/Files/Pdfs/library/brochures/pdfs/esri-cityengine.pdf [accesso: 29/01/2013]

Documentazione relativa al comando “*Extrude*” di Blender: <http://blender.active-domains.com/x/x2215.html> [accesso: 23/02/2013]

GIMP; strumento *software open source* di elaborazione grafica: www.gimp.org [accesso: 11/03/2013]

Documento tecnico FARO relativo al metodo di misura di distanza per mezzo di *Phase Shift* (Scostamento di fase): <http://www2.faro.com/site/resources/details/1772> [accesso 26/02/2013]

Descrizione generale di un *Geographic Information System*: http://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system [accesso: 13/03/2013]

“*Interpreting in 3D*”, Tesi di Dottorato di Carolina Ask, Lunds Universitet: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=2543931&fileId=2543934> [accesso 15/12/2012]

Prodotti di Geodesia Leica: <http://www.leica-geosystems.it/it/index.htm> [accesso: 09/04/2013]

“*The London Charter*”; visualizzazione informatica del Patrimonio Culturale: <http://www.londoncharter.org/introduction.html> [accesso: 12/01/2013]

Progetto di *Digital Archaeology* curato da *English Heritage* relativo alle *Long-House*: <http://www.english-heritage.org.uk/daysout/properties/wharram-percy-deserted-medieval-village/history-and-research/long-houses/> [accesso 22/12/2012]

Istituto Ludwig Boltzmann sul progetto di Archaeological Prospection e Virtual Archaeology relativo ai siti di Birka and Uppåkra: <http://archpro.lbg.ac.at/birka-and-uppakra-%E2%80%93-iron-and-viking-age-rural-and-early-urban-landscapes> [accesso 27/03/2013]

Medieval Europe 2007, Quarto Congresso Internazionale di Archeologia Medievale e Moderna: <http://medieval-europe-paris-2007.univ-paris1.fr/> [accesso: 20/02/2013]

MeshLab; sistema *software open source*, portabile e personalizzabile per il processamento e montaggio di *mesh* triangolari 3D: <http://MeshLab.sourceforge.net/> [accesso: 18/01/2013]

MeshMixer; strumento di progettazione prototipale basato su *mesh* triangolari dinamiche ad alta risoluzione: <http://www.autodeskresearch.com/projects/meshmixer> [accesso: 19/02/2013]

Definizione di Metadato: <http://www.techterms.com/definition/metadata> [accesso 02/03/2013]

Tecnologia *Motion Capture* usata all'Università di Lund: <http://projekt.ht.lu.se/cc/techniques/motion-tracking/> [accesso: 12/04/2013]

Definizione UNESCO di Patrimonio Culturale Immateriale: <http://www.unesco.beniculturali.it/index.php?it/37/definition-of-intangible-cultural-heritage> [accesso 08/02/2013]

PhotoModeler; strumento fotogrammetrico per estrazione di modelli 3D da immagini fotografiche: <http://www.photomodeler.com/index.html> [accesso 26/01/2013]

Photoscan; tool software di *Dense Stereo Matching* e *Structure From Motion* per produrre 3D da immagini: <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/> [accesso 28/01/2013]

Rome Reborn; modello digitale di Roma antica: <http://www.romereborn.virginia.edu/> [accesso 20/01/2013]

Descrizione dello storytelling come forma d'arte prima che espressione della narrazione: <http://www.storynet.org/resources/whatisstorytelling.html> [accesso 11/04/2013]

Informazioni sulla *Tabula Peutingeriana*: <http://www.tabula-peutingeriana.de/> [accesso 16/02/2013]

Documentazione relativa alla generazione di *texture* mediante Blender: <http://wiki.blender.org/index.php/Doc:2.6/Manual/Textures> [accesso: 04/04/2013]

Unity, un ecosistema per sviluppo di piattaforme tridimensionali *gaming*, con motore di *rendering* e strumenti per la creazione di contenuti 3D interattivi: <http://unity3d.com/unity/> [accesso 21/12/2012]

Uppåkra, il più importante sito scandinavo dell'età del ferro. Insediamento urbano dal 100 a.C. al 1000 d.C.: www.uppakra.se [accesso 25/02/2013]

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1. La modellazione filologica dei lotti abitativi del Settore III di Cencelle - p. 8.

Fig. 2. Un'immagine del progetto "*Rome Reborn*"; da <http://www.romereborn.virginia.edu/> - p. 10.

Fig. 3. Le acquisizioni dell'area cimiteriale effettuate in *Computer Vision* – Giorno 1; da <http://nico-digitalarchaeology.blogspot.it/> - p. 13.

Fig. 4. Le acquisizioni nell'area cimiteriale di Cencelle in *Computer Vision* - Giorno 2; da <http://nico-digitalarchaeology.blogspot.it/> - p. 13.

Fig. 5. Una delle numerose vaschette presenti nei quartieri residenziali restituita in 3D con PhotoScan - p. 14

Fig. 6. La città di Leopoli-Cencelle vista da Ovest giungendo dalla via Aurelia; Foto Archivio Cencelle - p. 16.

Fig. 7. La rappresentazione di Centumcellae sulla Tabula Peutingeriana, la copia di XII secolo di una mappa romana; da <http://www.tabula-peutingeriana.de/> - p. 19.

Fig. 8. La collina e i resti di Cencelle in una foto aerea da Sud-Ovest; Foto Archivio Cencelle - p. 22.

Fig. 9. La via gradata che attraversa la città da Est a Ovest; Foto Archivio Cencelle - p. 23.

Fig. 10. Il complesso edilizio di case a schiera che comprende all'estremità una torre (in blu) e una casa-torre (in verde), prospiciente la piazza con cisterna (in rosso); Foto Archivio Cencelle - p. 25.

Fig. 10bis. Il ricevitore GPS differenziale RTK Altus utilizzato nella campagna di scavo 2012; Foto Nicolò Dell'Unto - p. 28.

Fig. 11. La Scheda informatizzata per il Materiale Ceramico; da Leopoli-Cencelle I 1999 - p. 33.

Fig. 12. La Cripta della chiesa medievale di Cencelle vista dall'alto e dall'interno; Foto M. Doriana De Padova 2012 - p. 35.

Fig. 13. La pianta vettorializzata dell'area della chiesa; da Archivio Cencelle - p. 36.

Fig. 14. L'operazione di allineamento delle acquisizioni della chiesa e della cripta; Foto Alvaro, Liberotti, Nepi 2009 - p. 37.

Fig. 15. La nuvola di punti ottenuta dalle scansioni effettuate nella chiesa; Foto Alvaro, Liberotti, Nepi 2009 - p. 38.

Fig. 16. La mesh generata per visualizzare parti significative dell'architettura della cripta; Foto Alvaro, Liberotti, Nepi 2009 - p. 39.

Fig. 17. Il modello 3D della cripta realizzato con 3Ds Max nel 2009 in seguito alle acquisizioni con laser scanner; Foto Alvaro, Liberotti, Nepi 2009 - p. 40.

Fig. 18. Le fasi della creazione di un'ortoimmagine del teatro di II secolo della città romana di Carnutum; Foto Verhoeven *et al.* 2012 - p. 41.

Fig. 19. Il modello della cripta, visualizzata come insieme di poligoni, ottenuto con PhotoScan - p. 42.

Fig. 20. Particolare del modello della cripta ottenuto con PhotoScan in versione "solid" - p. 42.

Fig. 21. Il modello della cripta in versione "texturizzata" - p. 43.

Fig. 22. Il risultato finale, "texturizzato", dell'acquisizione dei graffiti - p. 43.

Fig. 23. Le posizioni della camera in PhotoScan e la nuvola di punti dei graffiti - p. 44.

Fig. 24. Particolare delle tacche graffite in visualizzazione "solid" - p. 46.

Fig. 25. L'area cimiteriale in prossimità della chiesa acquisita in *Computer Vision*; da - p. 49.

Fig. 26. lo scavo dell'area cimiteriale di Cencelle documentato giornalmente in *Computer Vision* - p. 49.

Fig. 27. Due strati differenti della stessa area di scavo documentati in giorni diversi in 3D con l'ausilio della *Computer Vision*; Foto Callieri 2011 - p. 51.

Fig. 28. Modelli 3D degli strati acquisiti in fasi differenti dello scavo; Foto Callieri 2011 - p. 52.

Fig. 29. Il sistema di visualizzazione degli strati georiferiti ideato da UC Merced e UC Berkeley a Çatalhöyük; Foto Forte *et al.* 2012 - p. 53.

Fig. 30. Visualizzazione 3D dei diversi strati scavati in uno degli ambienti a Çatalhöyük; Foto Forte *et al.* 2012 - p. 54.

Fig. 31. Il laser Scanner FARO Focus 3D, piccolo e leggero illustrato agli studenti a Cencelle; Foto Nicolò Dell'Unto - p. 56.

Fig. 32. Il settore I e il settore III allineati usando sassi come *marker*, posizionati in punti strategici lungo la strada in discesa - p. 58.

Fig. 33. Il profilo degli edifici acquisiti georiferiti in due giorni con il GPS differenziale RTK Altus - p. 59.

Fig. 34. Le nuvole di punti corrispondenti ai vari *scan* importate in MeshLab - p. 60.

Fig. 35. Il processo di allineamento delle nuvole di punti in MeshLab - p. 61.

Fig. 36. La nuvola di punti generata da 36 immagini acquisite nell'ambiente B nel Settore III - p. 65.

Fig. 37. Le 36 posizioni della camera nel corso dell'acquisizione fotografica dell'ambiente B - p. 66.

Fig. 38. La geometria molto densa ottenuta da 36 immagini per l'ambiente B del Settore III - p. 67.

Fig. 39. L'ambiente B del Settore III "texturizzato" in PhotoScan - p. 68.

Fig. 40. Le posizioni della camera al momento dell'acquisizione delle immagini mostrano anche quale tipo di percorso strategico si sia seguito per massimizzare i risultati in 3D - p. 69.

Fig. 41. Il modello del mastio di Monreale-Sardara (CA) in 3D ottenuto da foto aeree scattate per documentazione bidimensionale; Foto inedita M. Doriana De Padova 2012 - p. 70.

Fig. 42. La Casa del Torello di Bronzo, risultato delle acquisizioni con laser scanner; Foto <http://www.lunduniversity.lu.se/o.o.i.s?id=24732&postid=3346585> - p. 71.

Fig. 43. La visualizzazione in tempo reale della Casa di Cecilio Giocondo all'interno dell'*iCube* presso IKDC-Lund; Foto <http://www.lunduniversity.lu.se/o.o.i.s?id=24732&postid=3346585> - p. 72.

Fig. 44 La nuvola di punti derivata dalle acquisizioni con *LiDAR* che documenta il pavimento in mosaico all'interno della chiesa; Foto UCSD Calit2/CISA3 <http://antiquity.ac.uk/projgall/levy335/> - p. 74.

Fig. 45. Documentazione aerea video di un interno angusto con un KKopter; Foto <http://arc-team-open-research.blogspot.it/search?updated-max=2013-03-25T00:17:00%2B01:00&max-results=7> - p. 76.

Fig. 46. Il risultato dell'applicazione di SfM/IBM da video in un contesto subacqueo; Foto <http://arc-team-open-research.blogspot.it/search?updated-max=2013-03-25T00:17:00%2B01:00&max-results=7> - p. 77.

Fig. 47. Il modello del *Rose Theatre* di Londra con gli *avatar* di attori e pubblico in azione; Foto Delbridge Tompkins 2012 - p. 90.

Fig. 48. Un esperto di archeologia sperimentale simula una battaglia coperto di marker che tracciano i suoi movimenti con la *Motion Capture*; Foto *Lund University Umanities Lab* - p. 93.

Fig. 48bis. L'ambiente virtuale della cripta esportato in MeshLab, che si potrebbe popolare con i riti o cercando di interpretarne l'uso (forse una prigione?) dopo l'abbandono - p. 98

Fig. 49. In evidenza i lotti di edilizia residenziale e artigianale in prossimità delle mura a Cencelle; Foto Archivio Cencelle - p.102

Fig. 50. Il settore I e il Settore III in foto aeree. Visibile la pianta che segue la conformazione della collina; Foto Archivio Cencelle - p. 103

Fig. 51. Il settore I modellato filologicamente con Blender - p. 106.

Fig. 52. Il piano terreno dell'ambiente 1 con le due vaschette quadrangolari - p. 107.

Fig. 53. Il sistema idraulico passante fra l'ambiente 1 e l'ambiente 2 (immagine e modello); Foto M. Dorian De Padova 2006 - p. 107.

Fig. 54. Il lotto che segue la via gradata e il piccolo "profferlo" che avrebbe dovuto dare accesso al piano superiore dell'ambiente 1; Foto Archivio Cencelle - p. 108.

Fig. 55. Il sottoscala nell'ambiente 1; Foto M. Dorian De Padova 2006 - p. 109.

Fig. 56. La vaschetta di forma circolare irregolare nell'ambiente 2; Foto M. Dorian De Padova 2006 - p. 110.

Fig. 57. L'ambiente 2 del settore I, mattonato quindi considerato aperto. Immagine e modello; Foto M. Dorian De Padova 2006 - p. 111.

Fig. 58. L'ambiente 3 come appare e il modello con la tettoia che avrebbe potuto coprirne l'accesso; Foto Archivio Cencelle - p. 112.

Fig. 59. La vaschetta *in situ* nell'ambiente 1 visualizzata con MeshLab - p. 114.

Fig. 60. La seconda vaschetta quadrangolare dell'ambiente 1 visualizzate in MeshLab - p. 114.

Fig. 61. La vaschetta quadrangolare presente nel settore II visualizzata in Meshlab - p. 114.

Fig. 62. La vaschetta tonda del settore I visualizzata in MeshLab - p. 115.

Fig. 63. La vaschetta tonda del settore III visualizzata in MeshLab - p. 115.

Fig. 64. La vaschetta irregolare del settore I comparata alla vaschetta circolare del settore III - p. 115.

Fig. 65. Il settore III di Leopoli-Cencelle modellato in Blender - p. 116.

Fig. 66. L'ambiente D del settore III, immagine e modello; Foto M. Dorian De Padova - p. 123.

Fig. 67. Il blocco di trachite, forse l'alloggiamento di un meccanismo di chiusura; Foto M. Dorian De Padova - p. 119.

Fig. 68. L'Ambiente B, identificato come "granaio"; immagine e modello; Foto M. Dorian De Padova - p. 119.

Fig. 69. Il modello dell'Ambiente A, provvisto di un'area mattonata, quindi interpretato come uno spazio in parte aperto. La parte coperta da assi lignei è B, il cosiddetto "granaio" - p. 121.

Fig. 70. L'ambiente E interpretato come abitazione con caratteristiche delle case a schiera - p. 122.

Fig. 71. La casa F e l'ambiente a lato dell'ingresso, interpretato come deposito coperto; Foto M. Dorian De Padova - p. 122.

Fig. 72. Modello degli ambienti C e H; visibile l'apertura che li rende comunicanti - p. 123.

Fig. 73. Gli ambienti C e H e il loro rapporto con gli altri ambienti del settore III (vista da Sud-Est); visibile la "tracerna" che li separa dall'ambiente D, modello - p. 124.

Fig. 74. L'accesso agli ambienti R e P che si sviluppano parallelamente alla strada, modello - p. 125.

Fig. 75. Il bancone in muratura a ridosso del muro Ovest su un'area mattonata dell'ambiente P; Foto M. Dorian De Padova 2010 - p. 125

Fig. 76. Modello dell'ambiente P, mattonato, quindi interpretato come una corte aperta - p. 126.

Fig. 77. Modello dell'ambiente P, particolare della vaschetta (ora all'interno di R) e del bancone in muratura addossato al muro Ovest - p. 126.

Fig. 78. Gli ambienti S e T, perfettamente simmetrici; immagine e modello; Foto M. Dorian De Padova - p. 127.

Fig. 79. La vaschetta in muratura nel sottoscala degli ambienti T ed S, immagine e modello; Foto M. Dorian De Padova - p. 128.

Fig. 80. Il livello delle aperture ad arco da aggiungere o sottrarre a seconda delle interpretazioni all'interno di Blender e di MeshLab - p. 130.

Fig. 81. La versione del modello con aperture ad arco, creata aggiungendo un nuovo livello in Blender - p. 131.

Fig. 82. La pianta del Settore III elaborata dall'École Française de Rome con i gruppi di edifici evidenziati con colori diversi; Pianta François Bougard - Archivio Cencelle - p. 132.

Fig. 83. La visualizzazione in Blender della pianta di scavo integrata nel modello 3D; Pianta François Bougard - Archivio Cencelle - p. 132.

Fig. 84. Le mesh poligonali realizzate in PhotoScan allineate alla pianta di scavo in Blender- p. 133.

Fig. 85. La mesh dell'ambiente S in visualizzazione *wireframe* - p. 133.

Fig. 86. L'ambiente B, il "granaio" nel corso della modellazione delle ipotesi - p. 134.

Fig. 87. La mesh dell'ambiente S integrata nella modellazione delle ipotesi - 134.

Fig. 88. La mesh "texturizzata" dell'ambiente F allineata alla pianta di scavo per elaborare la modellazione delle ipotesi in Blender - p.135.

Fig. 89. Ipotesi 1 sull'assetto dell'ambiente F, interpretato come una casa a schiera - p. 136.

Fig. 90. Ipotesi 2 secondo la quale l'ambiente F è interpretato come un'area aperta - p. 137.

Fig. 91. Ipotesi 2 (in una prova di "texturizzazione") sull'ambiente F interpretato come aperto - p. 138.

Fig. 92. La vaschetta circolare del settore III realizzata con PhotoScan, scalata e ri-collocata nell'ambiente P anziché in R dove si trova attualmente - p. 139.

Fig. 93. La *mesh* poligonale dell'ambiente B importata in MeshLab - p. 140.

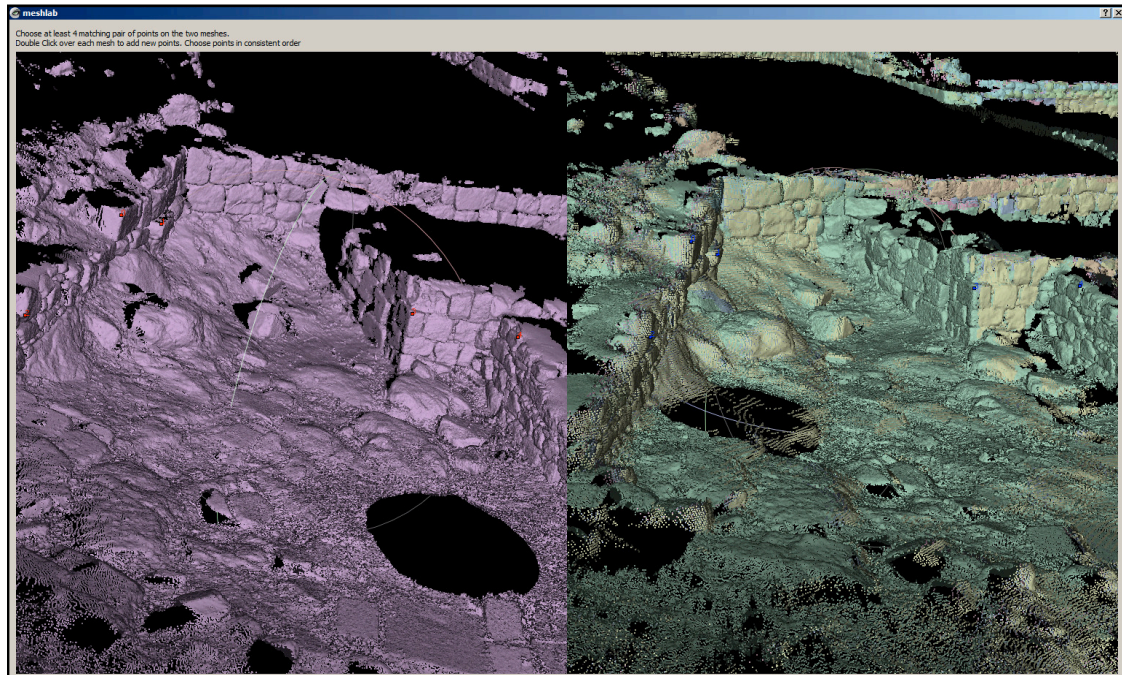
Fig. 94. Il prospetto del muro Nord dell'ambiente B disegnato a mano nel corso dello scavo; Disegno François Bougard - Archivio Cencelle - p. 141.

Fig. 95. Il filtro "*Radiance*" e "*Radiance color*" applicato in MeshLab al modello del muro nord dell'ambiente B - p. 141.

Fig. 96. Il filtro "*Color by border distance*" applicato alla *mesh* dell'ambiente B in MeshLab - p. 142.

APPENDICE

Tavola 1.



Il processo di allineamento delle nuvole di punti in forma di *Range Maps* (risultato delle acquisizioni nel settore III di Cencelle. In rosso e in blu visibili i punti necessari (almeno quattro) per l'allineamento manuale.

Il vuoto di forma circolare visibile nelle nuvole di punti corrisponde alla posizione dello scanner.

Tavola 2.



Il risultato dell'allineamento completo di otto nuvole di punti relative al settore III. Una volta allineate la *Range Maps* si è applicata la funzione di “*flattening*” per ridurre le nuvole di punti a un'unica *mesh*.

Tavola 3.



L'allineamento in corso delle ventisette nuvole di punti relative al settore I. Nonostante siano state precedentemente decimate, si è di fronte a dettagli molto densi. Ai “*false colors*” di *default* usati nel corso dell'allineamento si è sostituito il “*color per vertex*” acquisito dalla camera integrata allo scanner.

RINGRAZIAMENTI

A Nicolò Dell'Unto, che mi ha appoggiata, assistita e insieme all'Università di Lund si adoperato per mettermi a disposizione strumenti e mezzi, permettendomi, in quest'ultimo anno intenso di apprendere, sperimentare, "introiettare", metodi e software nel campo della *Digital Archaeology*.

To Carolina Larsson and Stefan Lindgren, for their generosity and patience assisting in technical matters, their friendly approach and their company in the basement while I was struggling with models.

Alle Professoressa Francesca Bocchi e Rosa Smurra che mi hanno concesso di intraprendere e completare questi tre anni ricchissimi, seguendomi, spronandomi e appoggiandomi anche a distanza.

A Francesca Romana Stasolla che mi è sempre stata vicina lungo la via di Cencelle rispondendo a ogni mio dubbio con grande competenza e incoraggiandomi a percorrere nuove strade.

A Elena Toffalori per i suggerimenti preziosi, per l'ospitalità, e per aver risolto le questioni burocratiche, a Pera e a Rumba, per aver dato tepore (e qualche miagolio) ai miei soggiorni bolognesi.

A Daniele Ferdani che con grande pazienza mi ha dato i primi rudimenti di 3D.

Alla mia famiglia che mi ha concesso di raggiungere anche questa meta, partecipando ai miei entusiasmi e ai momenti d'ansia.

Infine a mio marito che mi ha supportata e ha sopportato con spirito di abnegazione la mia assenza e la mia -talvolta molesta- presenza.